

# 魚体の超音波反射指向性パターンおよび 反射波形の変動に関する基礎的研究

山 中 有 一

## Fundamental Studies on the Variations in Scattering Patterns and Echo Shapes of Fish<sup>\*1</sup>

Yuichi Yamanaka<sup>\*2</sup>

*Keywords*: Echo sounder, Scattering pattern, Echo shape,  
Interference, Frequency analysis

### Abstract

In recent years, quantitative echo sounders are generalized to survey fish stocks. An echo integration method using fish target strength (TS) as principal parameter is investigated and improved the accuracy. On one hand, the estimation of individual fish which are determination of fish species or body length is incompletely. A great deal of effort has been made on this problem. What seems to be lacking, however, is direct information in the echo signals. Periodic change in scattering patterns and wave-form variation of reverberation are discussed in this dissertation, in order to obtain informations of an individual fish.

Some basic experiments to observe the echo shapes and periodic changes in scattering patterns are described in Chapter 2. The results of these experiments are explained theoretically in Chapter 3.

A period of changes in a scattering pattern can be applied to estimate the distance between two acoustic sources. In Chapter 4, an experiment with two steel balls, the distance between two acoustic sources was calculated from the periodic change of the scattering pattern by using an auto-correlation function. It was

---

\*1 北海道大学審査学位論文 (Thesis submitted for the Degree of Doctor of Fisheries Science at Hokkaido University, December, 1993)

\*2 鹿児島大学水産学部漁船航海学講座 (Laboratory of Feishing Vessel Navigation, Faculty of Fisheries, Kagoshima University, 50-20 Shimoarata 4, Kagoshima, 890 Japan)

confirmed that the period of the carrier changed appreciably when the echo amplitude was cancelled due to interference. This phenomenon will be used to indicate a state of interference on wave form fluctuation.

In experiments with eight species individual fishes, the echo pattern showed a periodic change which was estimated to be caused by interference. Also the period of the carrier fluctuated in the cancelled condition. In Chapter 5, the results of these measurements are described. The Spectrum of scattering patterns from individual fishes are analyzed in order to clarify the cause of periodic changes in dorsal aspect scattering patterns. Three species into target fishes were measured in three states, whole, without bladder, and skeleton. The power spectrum was calculated from scattering patterns which transformed to distance-amplitude coordinates from incidence angle-amplitude coordinates. The elemental patterns and power proportion of each frequency band were calculated by using convolution integration of the power spectrum and filter-function in the frequency region. Analysis shows that a relationship was observed between fish species, or fish figure, and the characteristics of the changing period.

Chapter 6 contains a summary of this research and discussion about an application of information included in echo shape.

魚体の超音波反射指向性パターンおよび反射波形の変動に関する基礎的研究

目 次

序 論

第1章 測定装置

1.1 水槽実験

1.1.1 実験用水槽

1.1.2 使用魚群探知機

1.1.3 旋回装置とターゲット支持方法

1.1.4 信号処理システム

1.2 フィールド実験

1.2.1 測定場所および環境

1.2.2 使用魚群探知機および測定システム

第2章 反射指向性パターンと反射波形の観察

2.1 球体の実験結果および考察

2.1.1 使用球体と単球体の反射波形

2.1.2 2球体の反射指向性パターンと反射波形

2.2 魚体および魚体模型の実験結果および考察

2.2.1 使用魚体と魚体模型

2.2.2 反射指向性パターンの比較

2.2.3 反射波形の比較

2.3 シミュレーションによる反射指向性パターンおよび反射波形

2.4 フィールドでの球体および単体魚の実験結果および考察

2.4.1 フィールド実験の概要

2.4.2 懸垂法による反射指向性パターン

2.4.3 自然遊泳状態の単体魚のエコー記録

第3章 反射指向性パターンおよび反射波形の変動に関する理論的検討

3.1 連続波の合成

3.1.1 2連続波の干渉理論の背景

3.1.2 反射指向性パターンの振動と2球体間隔

3.2 パルス波形の合成

3.2.1 パルス包絡線の形状

3.2.2 局所的な搬送波周期の変動

## 第4章 2球体の反射指向性パターンと反射波形の変動の解析

### 4.1 2球体の反射指向性パターンの変動と反射音源間隔

#### 4.1.1 2球体の反射指向性パターン

#### 4.1.2 反射指向性パターンの座標変換

#### 4.1.3 自己相関係数による球体間隔の推定

### 4.1 2球体の反射波形の変動

#### 4.2.1 搬送波の周期変動の計測方法

#### 4.2.2 搬送波周期変動の計測結果

## 第5章 魚体の反射指向性パターンおよび反射波形の解析

### 5.1 測定方法および使用魚体

### 5.2 背方向反射指向性パターンの変動要因の分析

#### 5.2.1 反射指向性パターンの変動についての予備的検討

#### 5.2.2 反射指向性パターンの振動スペクトル

#### 5.2.3 ターゲットの仮想音源間隔の計算

#### 5.2.4 背方向 $\pm 30^\circ$ , $\pm 15^\circ$ のパワースペクトル

### 5.3 魚体の反射波形の変動

#### 5.3.1 極大-極小点時間差の推定

#### 5.3.2 異なる魚種, 処理状態での比較

## 第6章 総合考察

### 6.1 多数の連続波の合成と干渉

### 6.2 反射指向性パターンおよび反射波形の変動と魚体構造に関する情報

結	論
謝	辞
文	献



## 序 論

### 1. 研究の背景

水中における情報伝達の媒体は音響が最も実用的なものであり、水産分野においても様々な音響利用機器が開発され新たな利用法が考案されてきた。なかでも能動的に音響パルスを発生し、反射信号を収集することによって水中の情報を得るアクティブソナーに関する技術は重要なものである。当初音響測深機として漁船に装備されたソナーの記録から魚群映像が得られることが見いだされ、魚群探知機として水産分野に応用されるようになり、1930年代には多くの魚種について音響探知記録が報告された<sup>1,2)</sup>。1940年前後の第2次世界大戦による混乱期を経た後、魚群探知機は高度な軍事関連技術が生かされることによって急速に発展・普及していった。魚群探知機の普及は、漁船性能の向上とともに漁業の効率化を促進し、食糧生産の拡大に貢献した。しかし一方では乱獲による資源の減少を招く一因にもなっていた。

1950年代になると水産資源の実態の把握を目的とした魚群探知機の応用が研究されるようになった。Cushing<sup>3)</sup>が英国沿岸における herring の調査で行った単体記録の計数による資源量の評価、黒木・中馬<sup>4)</sup>が池田湖で行った魚群記録の大きさと濃度を利用したワカサギ・マス類の資源量評価などを始めとして、国内外で数多くの資源量推定の試みがなされた<sup>5-7)</sup>。この段階での信号処理は通常魚群探知機の記録紙像やオシロスコープの目視による読みとり依存していた。

1960年代には資源量評価のための魚群探知機は独自の発展をはじめ、自動的な定量化法としてエコー計数方式<sup>8)</sup>とアナログ積分方式<sup>9,10)</sup>が開発され、それぞれ単体エコーを対象とする低密度魚群の定量化、群体エコーを対象とする広域・高密度魚群の定量化を目的として分化していった。

1970年代にはいって標的強度 (Target Strength, 以下 TS) とソナー方程式を基礎とする資源量推定の理論<sup>11-13)</sup>が確立されて積分方式の有効性が認められ、資源の定量化を目的とする計量魚探システムの主流として様々な角度から検討され<sup>14,15)</sup>、普及していった。この背景には急速に発展する電子機器の技術革新を取り入れた信号処理のデジタル化・高精度化と、水産資源の保護・管理に対する社会的要求の増大がある。積分方式による計量魚探は、広域性、即時性、省力性、環境に対する省干渉性などの優れた特徴を備えており、多くの実用機が開発されて世界中の水産資源量推定に活用されている。

エコー計数方式はマグロ<sup>16)</sup>、サケ<sup>17-19)</sup>など大型魚種の資源量推定、生け簀内の魚量推定<sup>20)</sup>、定置網入網量の推定など、独自の応用が進められてきた。また信号処理の高度化とマイクロプロセッサの利用に伴って、エコー像のパターン認識を用いたより高度な計数方式<sup>21)</sup>やエコートレース解析による魚体の姿勢や遊泳運動の推定<sup>22)</sup>などの新たな解析手法に発展してきている。

音響による資源量推定に並行して、1950年代なかばから単体魚の超音波反射に関する基礎的研究が行われるようになった。橋本<sup>23)</sup>は基本パラメータとして広く用いられている TS に相当する“反射損失”を定義するとともに、測定の指針を示した。その後1960年代後半にか

けて多くの研究者がこの研究に従事し、魚体の幾何学的なモデル化<sup>24, 25)</sup>、TS と姿勢角や鰾の関係<sup>26)</sup>などについて議論され、複雑な魚体の反射特性を明らかにする努力がなされた。測定手法はテグス、おもり、フロートなどを利用して魚体を支持・制御する懸垂法が中心であった。

1970年代以降は、積分方式の発展に伴って資源量推定の基本パラメータとしての TS の研究が、単体魚を対象とする研究の主要な課題となった。積分方式は TVG アンプ (Time Varied Gain amplifier) によって距離減衰補正された信号を 2 乗検波し、包絡線 (envelope) 信号としてサンプリングする。さらにエコーインテグレーターによって深度方向・水平方向に平均化された積分値として体積後方散乱強度 (SV) を得る。この値と単体魚の平均 TS から平均分布密度をもとめ、資源量を推定する。単体魚の TS は資源量推定の精度を左右する重要なパラメータである。しかし単体魚の超音波反射には Haslett<sup>27-29)</sup> が指摘したように魚体の内部構造に起因すると推定される反射振幅の変動が顕著に表れ、複雑な反射指向性パターンを描く。そこで懸垂法によって平均 TS を求める場合、自然遊泳状態での姿勢角確率密度関数 (PDF) によって測定値に重み付けをし、最適平均 TS を決定する<sup>30-32)</sup>、などの間接的、統計的処理が用いられている。

TS を求めるための計測手法は懸垂法以外に様々な方式が提案された。飯田が目的と手法について行った分類<sup>33)</sup>では11種にのぼる。近年では尾数が既知であるケージ内遊泳魚群の SV から TS を測定するケージ法<sup>34-36)</sup>や、デュアルビーム<sup>37)</sup>・スプリットビーム<sup>38)</sup>・理想ビーム<sup>39)</sup>など高度な送受信システムによってフィールドにおける自然遊泳状態の単体魚の TS を直接測定する *in situ* 推定法が確立され、その手法を応用した研究<sup>40-43)</sup>が盛んに行われている。

単体魚を対象とする場合、TS の測定と並んで魚体長・魚の行動・魚種の推定は重要な課題であり、個体推定と呼ばれる。魚体長推定は TS との相関を利用して求める方法が多くの研究者<sup>44-49)</sup>によって報告され、広く利用されているが、魚種による相違や TS 測定の不安定さなど問題点も残されている。魚の行動推定に関しては、間庭、古澤<sup>50)</sup>が行った FM 魚群探知機の開発とドプラーシフトによる遊泳行動の分析があげられるが、本格的な実用化には至っていない。古澤<sup>22)</sup>によるエコートレース解析法は魚体の行動、姿勢などを推定するための有力な解析法として期待されている。魚種判別は非常に多くの要素を総合的に判断する必要があり、現時点では将来の課題と言わざるを得ない。

以上水産音響学の研究史を概観してみたが、今後の方向性の一つとして、ますます社会的要請の強まる資源保護の立場から魚種判別・魚体長推定の重要性が増すことが予測される。これら個体推定の信頼性が向上すれば未成熟魚体や目的外魚種の混獲防止に貢献し、持続生産を目的とする資源管理に資するものとなる。しかし現在水産音響学の基礎となっている TS とソーナー方程式による個体推定では、この問題が十分解明されたとはいいがたい。

TS とソーナー方程式による積分方式は様々な角度から高度化され、資源量推定の手段として非常に強力なものとなっているが、その適用には限界もある。それはソーナー方程式が基本的に音響強度に関する線形方程式であり、信号が搬送波周波数帯で持っている位相や波形の情報を直接扱っていないことが一因となっている。音響エネルギーの担い手はパルス変

調された搬送波である。したがって反射体の大きさが搬送波の波長に比較的近い場合は干渉による変動成分が大きくなる。この成分は第3章および第6章で詳述するように、無数の反射音源が一様ランダムに存在することが仮定でき、足し合わせの干渉と打ち消し合いの干渉が相殺する場合には影響は小さい。しかし単体魚のようにこの仮定ができない場合には魚体を構成する各部の反射が干渉し、魚体への入射角度によって反射信号は大きく変動する。単体魚のTS測定に伴う反射信号の変動は“あばれ”とも表現され、確率分布の仮定や統計処理などによって平均化する方法が検討されているが、いずれも間接的な処理であり誤差を伴う。また変動の原因は他にも多くの要素があり、未解明の点も多い。

個体推定における干渉の問題に搬送波周波数帯の信号が持つ位相などの情報を新たな情報収集手段として利用することが考えられるが、高速な信号処理と大量のメモリーが必要であることもあって十分な検討はなされていない。しかし近年の電子デバイス等基盤技術の進歩によって、高速かつ大量の信号処理が安価に利用できるようになった。また最近ではデジタル信号処理技術を用いてスペクトル拡散を応用した、ノイズに強い次世代のソナーシステム<sup>51, 52)</sup>が研究されており、これらハードウェアの発展からも検討の価値がある問題である。

## 2. 研究の目的および概要

本研究は単体魚の超音波反射に見られる反射指向性パターンと反射波形の変動について、魚体の内部に想定される複数の反射音源の干渉、という観点から検討したものである。研究の目的は従来一種のノイズと考えられてきた単体魚の反射指向性パターンと波形の変動について、魚体に関する新たな情報源としての利用可能性を検討することにある。

単体魚の反射指向性パターンの変動を魚体内の各部の反射波が干渉した結果であるとすれば、その変動特性は反射体の構造推定に利用できる可能性がある。また現在用いられている計量魚探を含む魚群探知機においては、検波によって包絡線信号をとりだす段階で搬送波位相の情報は失われる。そこで検波以前の高周波信号から位相や波形の情報を直接測定して解析すれば、干渉の影響を除外するために利用できる可能性がある。さらに干渉の状態を反射波から直接推定できれば魚体の構造推定、魚種判別に役立つことも考えられる。

これらの可能性を検討するために、基礎的な段階ではあるがいくつかの手法を試み、新たな知見を得ることができた。

実験は1次から4次まで段階を追って行った。本論の構成および各実験の概要は以下の通りである。

第1章では各実験に用いた装置の詳細を説明した。実験は懸垂法を用いた水槽実験を主体に行った。反射指向性パターンおよび波形の変動と、魚体の構造の関連を考察するには、基礎段階として精密に入射角度を制御された測定が不可欠である。そのために入射角度制御の高精度化と搬送波周波数帯の波形観測を目的とする自動測定システムを製作した。

第2章では1次および2次実験について述べた。1次実験は反射指向性パターンと反射波形の変動に関する現象を確認することを目的とした、水槽における基礎実験である。ターゲットには球体・単体魚・魚体模型を用いた。ここでは2球体の結果、魚体および魚体模型の結果、および波形合成のコンピュータシミュレーションを用いた現象論的な解釈について述べ

た。2次実験は1次実験で見られた現象を伝搬距離の長いフィールドで確認することを目的として、北海道倶多楽湖において行った。ここでは懸垂法による球体および単体魚の記録像、自然遊泳状態の単体魚の記録像について述べた。

第3章では1次および2次実験で確認した諸現象について理論的に検討した。基礎的な連続波の合成の理論を整理し、反射指向性パターンの周期性のある変動を説明した。またパルス波形の合成と反射波形の変動について検討し、反射波の搬送波周期が干渉の状態によって変化することを示した。

第4章では第3章の理論的な検討の検証を目的として行った3次実験について述べた。実験内容は1次実験の2球体による干渉の実験をさらに高精度化したものである。ここでは2球体の反射指向性パターンの変動の周期性から球体間隔を計算した。また反射波形の変動については搬送波周期の微小な変動の計測を試み、干渉による反射指向性パターンの変動との関連を考察した。

第5章では3次実験で得られた知見を様々な体型の魚体に応用した4次実験について述べる。ここでは変動の解析に時系列解析やスペクトル解析の応用を試み、反射指向性パターンの変動周期から計算した魚体内の仮想的な音源間隔と魚体長の関係、反射波の搬送波周期の微小な変動について考察した。

第6章では総合考察として、1次から4次の実験結果から得られた知見をもとに、魚体の超音波反射における干渉の取扱いと、変動の情報を魚体の構造推定に利用する方法について検討した。

## 第1章 測定装置

実験は1, 3, 4次実験として行った水槽実験と2次実験として行ったフィールド実験に大別される。水槽実験はほぼ同様の手法を用いたが、実験段階によって異なる機材を使用した部分があるので、実験段階との関連を明記しながら装置の構成について説明する。フィールド実験に関しては測定場所も含めて述べる。ターゲットならびに解析方法については内容ごとに各章で詳述する。

### 1.1 水槽実験

#### 1.1.1 実験用水槽

1次および4次実験で使用した水槽は鹿児島大学水産学部鴨池臨海地に製作した長さ5 m、幅3 m、深さ3 mの半埋設水槽で、地下部分は深さ約2.5 mである。地上部分は鉄骨構造で長さ方向に台車移動用のレールが敷設してある。台車はL字鋼を用いて送受波器支持用、旋回装置用、ハイドロホン用の3台を製作した。測定水深は1.3 mとし、送受波器音軸、ターゲット中心、ハイドロホン（沖電気 ST-1005）の中心をこの水深に設定した。

水槽側面は支柱用鉄骨と土止め用木製板材、底面は水平に均した土質で構成されている。水槽内側にはビニールコーティング防水シートを展張した。特別な吸音設備は施していないが、予備実験で使用してきたコンクリート水槽に比較して電気・音響ノイズが低い、高い残

響抑止効果がある、保温効果があり実験中の温度変化が少ない、などの利点が得られた。水槽にはろ過海水を満たし、気泡による影響を除くために各実験に先だって2日以上の脱気期間をおいた。水槽は大型テントで覆われ、風による水面動揺・攪拌は起こらない。

3次実験では北海道大学水産学部の屋内清水音響実験水槽を利用した。長さ12m、幅3m、深さ3mのコンクリート製で、内部側面および底面に吸音材として厚さ約5cmのスポンジが貼られている。

### 1.1.2 使用魚群探知機

1次および4次実験では50kHz単一周波数の通常魚群探知機（日本無線 NJA-280ku）を使用した。ただし記録紙駆動系からのノイズ発生を抑制するために記録部を切り離して、外部からトリガをかけられるようトリガコントロールユニットを付加してある。パルス幅は0.5msec、パルス繰り返し周期は波形をモニタしながら残響の影響が完全に無いことを確認した上で約1secに設定した。また魚群探知機の受信部は使用せず、送受波器に発生する反射信号電圧を、測定器保護のためのアレスタダイオードを介して直接信号解析処理装置に入力した。送受波器の指向角は半減全角で24°である。3次実験では50kHz単一周波数のカラー魚群探知機（日本無線 TFV-216）をパルス幅1msecで使用した。

### 1.1.3 旋回装置とターゲット支持方法

旋回装置はXYプロッターを改造して製作した。装置および機器接続の模式図をFig. 1-1に示す。回転軸に垂直に取り付けたアームの先端をプロッターのペン支持部で保持し、円弧を描かせることによって旋回させた。アームの旋回半径は120mm、プロッターの制御距離はx軸y軸方向について0.1mmであり、最小制御角は約0.07°を実現した。1次実験ではキーボード入力制御プログラムにより信号処理装置と独立して制御したが、3次、4次実験では自動測定プログラムに組み込んで完全自動制御とした。この装置によって搬送波の位相の微小な変動までを解析できる正確なデータの収集が可能になった。

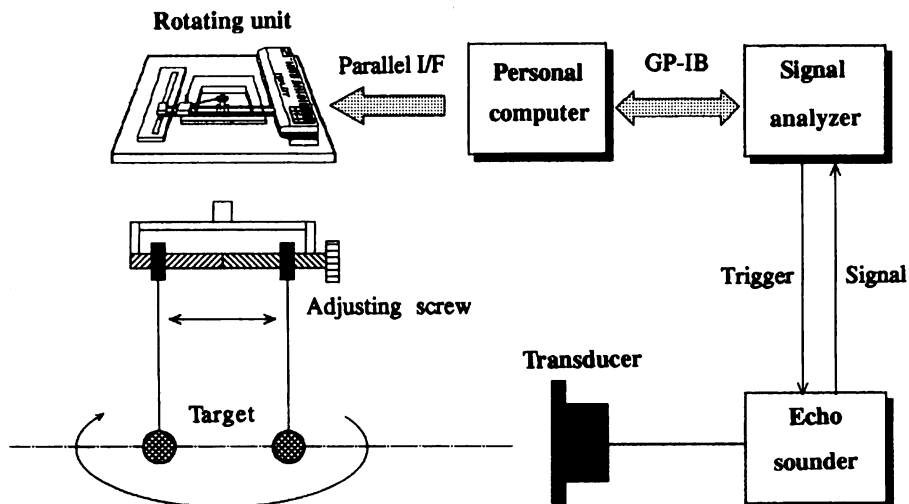


Fig. 1-1 The measurement system of water-tank experiments using control method.

図中のターゲット支持部は球体間隔制御装置の模式図で、ノブの回転によって0.1mmきざみで制御可能である。この装置はアダプターとして旋回装置に取り付ける構造になっている。

ターゲットの支持にはモノフィラメントナイロンテグス0.2号（直径0.09mm）、0.8号（直径0.15mm）を用いた。球体はナイロンテグス0.2号で作製したネットで包んで懸垂した。魚体はテグスを魚肉部に貫通させて結束し、フックなどの金具類を使用せずに懸垂した。Fig. 1-2は魚体の支持方法の模式図である。aは1次実験で行ったYaw planeにおける測定で、上下各2本のテグスで支持し、bは4次実験で行ったPitch planeにおける測定で、上下各4本のテグスによって支持した。Fig. 1-2 下方の魚体図は、各支持方法と入射角度の対応を示している。

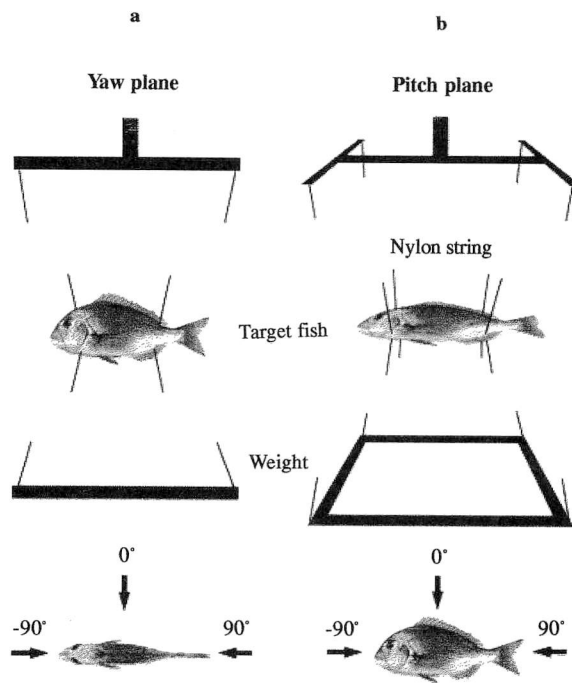


Fig. 1-2 Suspension method.

予備実験の結果、テグス・ネットによる反射は無視できるレベルだった。ターゲットと送受波器の距離は各実験ごとにサイドロープによる偽像が生じない位置を探索しながら、2.1m～2.4mに設定した。水槽寸法、水深、設定距離およびターゲット寸法は過去の実験例<sup>53)</sup>を参考にビーム幅、近距離音場限界距離、距離分解能および残響時間等の条件を計算し、十分余裕を持って諸条件を満足していることを確認した。

#### 1.1.4 信号処理システム

反射信号の取り込みと1次処理には汎用信号解析処理装置を用いた。1次および4次実験で使用した機種は岩崎通信機シグナルアナライザSM-2100Aで、入力部の仕様は、入力インピーダンス1MΩ、A/Dコンバーター量子化数12bit、サンプリング周波数409.6kHz、

電圧分解能  $24.4\mu\text{V}$  である。3 次実験で使用した機種は小野測器 CF-920s で、入力インピーダンス  $1\text{M}\Omega$ 、A/D コンバーター量子化数 12bit、サンプリング周波数 256kHz、電圧分解能  $24.4\mu\text{V}$  である。波形取り込み区間はトリガディレイを使用して反射波形を中心に 512word とした。これは 409.6kHz のとき 1.25msec、256kHz のとき 2.0msec に相当する。

1 次実験では信号解析処理装置の手動操作によって波形の取り込みと平均化処理を行ったが、3 次および 4 次実験ではインターフェースバス (GP-IB) を介してパーソナルコンピュータ (日本電気 PC9801) に接続し、巡回制御、平均化処理、波形データ転送、データ処理、プリントアウトまでを自動化したシステムを製作した。置換法により TS に換算された反射指向性パターン、振幅の pp 値の反射指向性パターン、データテーブル、波形と搬送波位相がプリントアウトされる。波形は相対的な形状の比較を目的としたので、各波形の最大振幅で規準化した。

巡回はターゲットの動揺を抑えるため  $0.1^\circ$  刻み、10 ステップで  $1^\circ$  回転させ、測定開始までに数秒の静止時間を設定した。波形データは不規則雑音を除去するために平均化処理し、平均波形としてフロッピーディスクに記録した。信号入力コンデンサーを介する交流接続によったので基本的に直流成分は除かれるが、平均波形の基線にはわずかなオフセットが残る。この影響を除くために波形の平均電圧を基準値として演算補正した。

## 1.2 フィールド実験

### 1.2.1 測定場所および環境

2 次実験は北海道倶多楽湖において行った。倶多楽湖の音響環境、生息魚類の生態等は飯田、鈴木<sup>54)</sup>によって明らかにされている。飯田らによると、倶多楽湖は内陸部標高 257m に位置する円形カルデラ湖で、周囲を山に囲まれ周辺の交通量や人家もほとんど無く静穏な条件を得られやすい。また貧栄養湖であるためプランクトンの発生や汚染が少なく不要反射体によるノイズも低い。ここではヒメマス *Oncorhynchus nerka* がほぼ単一魚種として生息しており昼間は中央部の水深が深いところを中心に群泳し夜間は岸近くに分散する、という特徴を持つ。そこで昼間魚群の出現が少ない位置で FRP ボート (全長 7.1m、幅 1.7m) を係留し、懸垂法によってヒメマスおよび 2 球体の反射指向性パターンの測定を行った。係留は陸岸からの係留索と 2 個のアンカーを使用し、船体の振れ回りを抑えた。

さらに夜間は毎秒 1 m 未満の低速で航走し、単体魚の自然遊泳状態の反射信号を測定した。なお以下に述べる測定装置は北海道大学水産学部漁業測器学講座で開発されたシステムである。

### 1.2.2 使用魚群探知機および測定システム

周波数 50kHz、パルス幅 1 msec、パルス繰り返し周期 1 sec の実験用デュアルビーム魚群探知機を使用した。送受波器指向角 (半減全角) はナロービームが  $13^\circ$ 、ワイドビームが  $33^\circ$  である。

フィールド実験では、データはアナログデータレコーダ (TEAC XR-310) によってビデオテープに記録し、後日再生データを処理した。測定システム模式図を Fig. 1-3 に示す。信号は検波前のプリアンプ出力を収録した。再生データは、デジタルストレージオシロスコー

プ(菊水 COM7101A)を GP-IB で接続したパーソナルコンピュータで制御して量子化し、フロッピーディスクに収録した。オシロスコープの量子化数は 8 bit, サンプル周波数は 256kHz で、反射波形を中心とする 512word を波形データとした。また TVG 処理後の検波出力も同時に収録した。

本装置は魚体の平均 TS の測定を目的として制作され、大型ステッピングモーターによってターゲット支持部の昇降および回転を行う。ターゲットは背方向を中心とする鉛直平面内で、およそ  $\pm 50^\circ$  の範囲で回転させる。ターゲット支持部は 1 本(球体の測定時)または 2 本(魚体の測定時)の鉄製シャフト、ターゲットを保持するためのテグス・フック・小フクロ、校正用のスチール球などで構成される。

回転時の角度情報は、ステッピングモーター駆動用パルスのカウントをアナログ電圧値に変換し、データレコーダーに反射信号と同時に収録される。

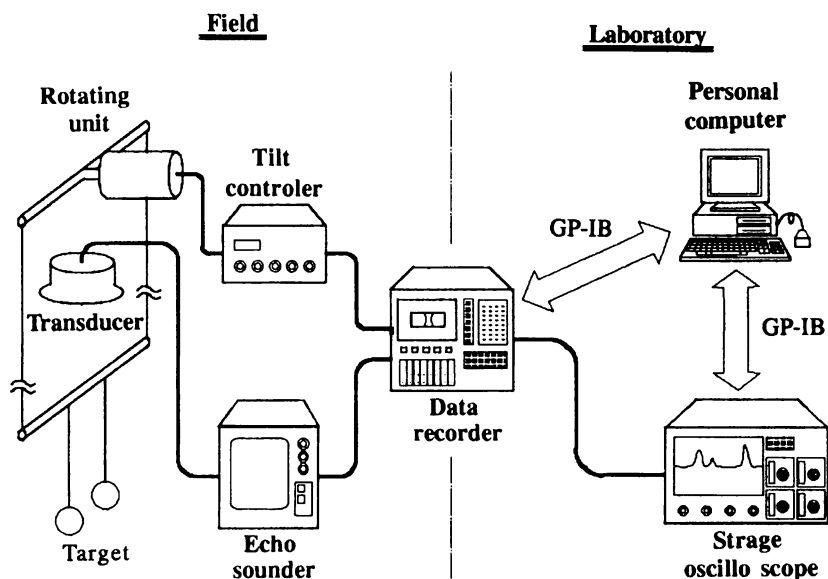


Fig. 1-3. The measurement system of field experiments.

## 第2章 反射指向性パターンと反射波形の観察

反射指向性パターンや反射波形の変動における搬送波周波数帯での干渉の影響については、十分な検討はなされていない。そこで1次実験として懸垂法による水槽実験を行い、球体・単体魚・魚体模型2種の反射指向性パターンを得るとともに反射波形の変動を観察した。また2次実験としてフィールドにおける測定も試みた。1次、2次実験は基礎的な段階であり測定システムの開発と定性的な諸現象の確認を目的とした。また波形合成のシミュレーションによって干渉の影響を現象論的に説明した。

従来、反射指向性パターンを論じる場合には TS の座標を用いるのが一般的であるが、本



論では変動特性に注目するために、変動量を感覚的に把握できる反射波振幅値の座標で表す。また反射波形とは搬送波周波数帯で測定された検波以前の波形を指すものとする。

## 2.1 球体の実験結果および考察

### 2.1.1 使用球体と単球体の反射波形

反射波の干渉による変動を考察する基礎として単体での指向角特性がブロードである球体の反射を測定した<sup>55)</sup>。球体には高精度の幾何形状を持つ高炭素クロム鋼製ボールベアリングを使用した。直径は15.9mm (5/8インチ球), 12.7mm (1/2インチ球), 10.0mm (10mm球) の3種である。

Fig. 2-1 にターゲット中心位置に設置したハイドロホンで測定した入射波形 **a** と3種の球体の反射波形 **b**, **c**, **d**, および各波形の pp 値を示す。1 球体の反射波形は送信波形に比較して波形の“なまり”はあるものの、ほぼ相似で安定したものであった。以後このような波形を基本波形と呼ぶ。

これらの球は周長と波長の比 ( $ka$ ) が1に近く、TS の上では Rayleigh 領域と幾何学領域の間の不安定な中間 (振動) 領域に入る<sup>56)</sup>。しかし Fig. 2-1 から波形自体は非常に安定し

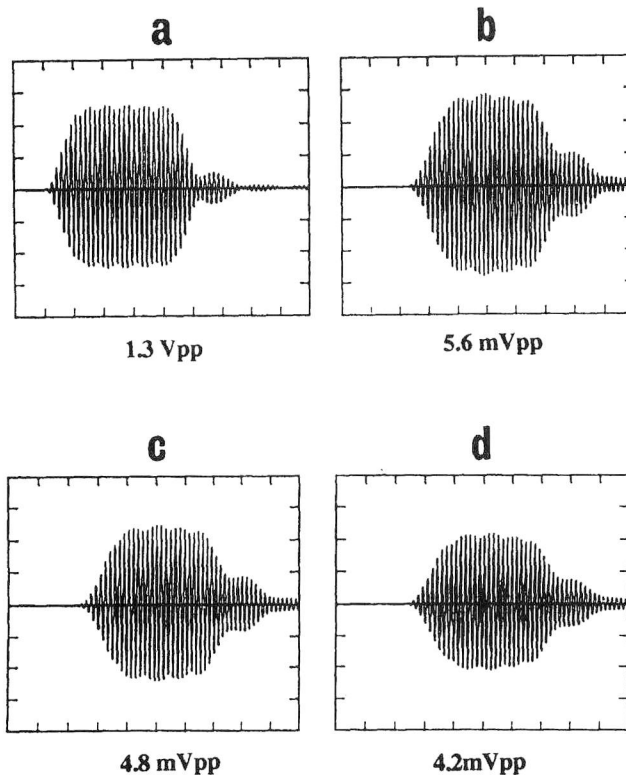


Fig. 2-1. The incident pulse shape, and echo shapes by each ball. **a**, Incident pulse shape, **b**, **c**, and **d**, Echo shapes by balls having diameters of 15.9mm, 12.7mm, 10.0mm, respectively.

たものであることがわかる。波形をモニタしているときも視認できるような変動は認められなかった。本実験では水の動揺や温度変化のない理想的な状態に近い状態、反射信号電圧も安定していた。したがって以後の実験で観察された変動は、球体が単独で持っている不安定さに由来するものではないことが確認された。

波形の包絡線にはリプル(脈動)があり、測定器のCRT上の波形像の内部には干渉模様が見える。これらはデジタルサンプリングしたことによって、搬送波周波数とサンプリング周波数が干渉を起こした結果である。アナログ系の測定器ではこのようなモアレ模様は現れない。サンプリング周期は波形解析装置の高精度クロックによるものであり安定している。したがってこのモアレ模様が不規則に変化すれば搬送波の周期に局部的な変動が起きている、と判断される。この現象は搬送波周期の微小な変動を視覚的に捉える目安となり、4章、5章では波形変動の指標として数値化を試みる。1球体の場合モアレ模様の変化に乱れはなく、周期が安定していること示している。

### 2.1.2 2球体の反射指向性パターンと反射波形

干渉の最も基本的な状態とみなせる2球体の反射を測定した。まず音軸上に2球体が接している状態から0.5mmピッチで球体が離れるよう音軸に沿って移動させた。この時の反射波ピーク電圧の変化をFig. 2-2に示す。なお配列aは12.7mm球2個、配列bは送受波器側に10mm球、後方に15.9mmを懸垂した。この大きな変動は2波形が異なる位相で合成され、干渉

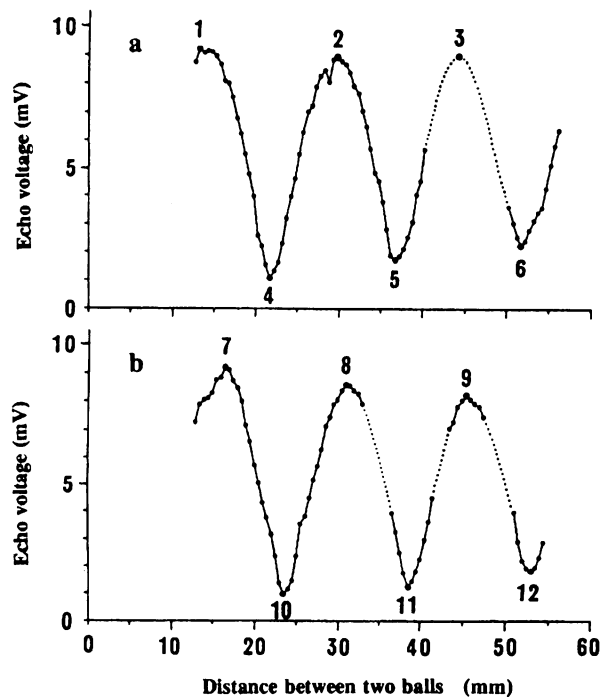


Fig. 2-2. The fluctuation curve of the reflected voltage when the distance between two balls is changed on the acoustic axis. a, Two balls of diameter 12.7mm; b, Two balls of diameter 10.0mm and 15.9mm.

が生じた結果である。なお図中の番号は極大点、極小点に付した連番号である。極大点間または極小点間の間隔はいずれも約15mmで $1/2$ 波長に一致し、変動の周期が伝搬距離差と波長の関係で決まることを示している。

Fig. 2-3 は Fig. 2-2 における極大点、極小点の波形を示したものであり、番号は Fig. 2-2 に対応する。極大時の波形（1～3，7～9）は1球体の波形に相似しているが、極小点（4～6，10～12）では特徴的な重鈴型を示している。この波形は極小点の前後2mmの狭い範囲で観測された。極小点の近傍では重鈴型とはみなせない場合でも波形に不規則性がみられた。この場合波形内のモアレ模様も不規則に変動し搬送波の周期が変化していることが推察された。この現象は以後の実験に共通して現れたもので反射体によらず極小点付近の歪みのある多くの波形で観測された。

配列 a では重鈴型の前後ふたつのピークはいずれの極小点でもほぼ等しい（4～6）が、配列 b では後方のピークが大きい（10～12）。これは配列 b が後方に大きな球を置いたためであり、波形が重ならない区間で個々の球体の波形が干渉を受けずに表れていることによる。したがってこの場合反射波形の変化は反射体の大小関係の情報を表している。

次に魚体内の体軸方向に分布する2音源の干渉を想定し、姿勢角による変動との関連を考

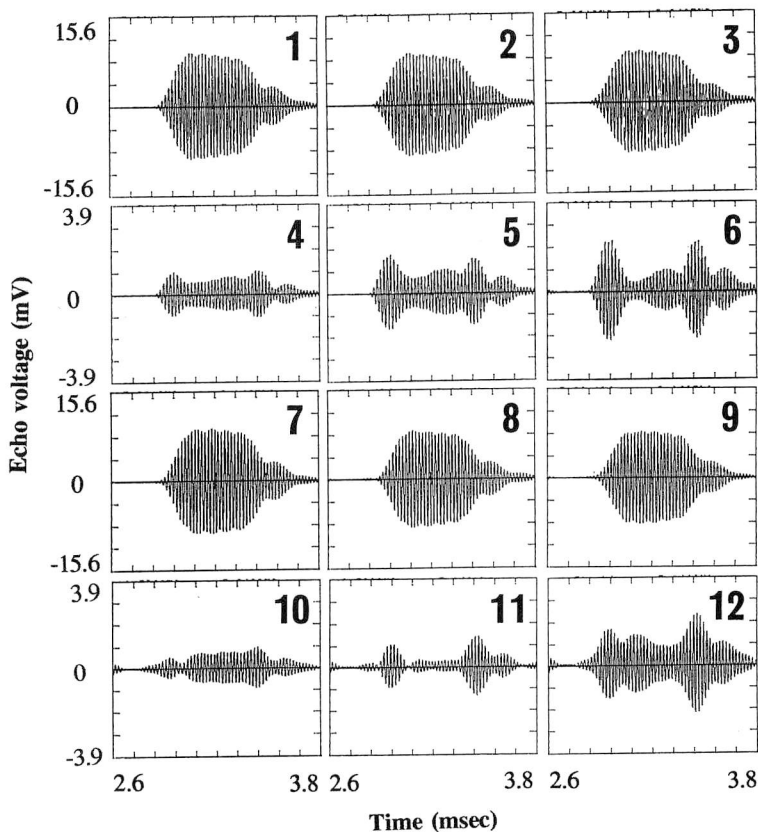


Fig. 2-3. Echo shapes by the pair of two balls when the distance between two balls is changed on the acoustic axis.

察するために、間隔を固定した2球体を水平面内で旋回させて測定した。Fig. 2-4 a は極大点番号3が現れた間隔(44.2mm)での12.7mm球2個の旋回実験結果、Fig. 2-4 b は極小点番号3が現れた間隔(44.2mm)での12.7mm球2個の旋回実験結果、

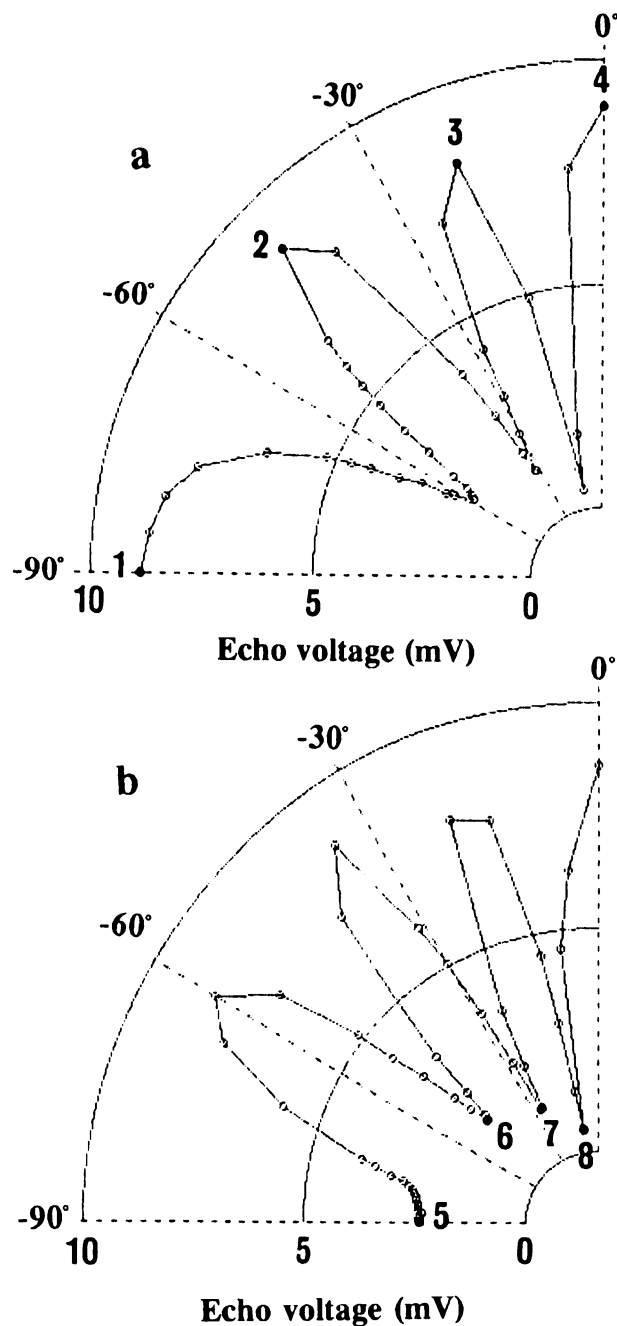


Fig. 2-4. The polar diagrams of the fluctuation of the reflected voltage when the pair of two balls of diameter 12.7mm is turned in horizontal plane. a, Turning at the maximum point of the reflected voltage; b, Turning at the minimum point of the reflected voltage.

号9が現れた間隔(51.7mm)での結果である。測定は変化の激しい部分は $1^{\circ}$ ピッチ、その他は $5^{\circ}$ ピッチで行った。 $0^{\circ}$ が音軸に垂直に並び伝搬距離差が無い状態、 $-90^{\circ}$ が音軸上に並び伝搬距離差が最大となる状態を示している。

Fig. 2-4 aで番号を付した極大点1～4およびFig. 2-4 bの極小点5～8の波形をFig. 2-5に示した。周期的に極大と極小が現れ、波形の変化もFig. 2-3の1～6と同様の傾向を示している。

Fig. 2-6はFig. 2-2の配列bの極大点番号9が現れた間隔(45.4mm)、極小点番号12が現れた間隔(52.9mm)で大きさの異なる球体を $-90^{\circ}$ から $90^{\circ}$ まで $180^{\circ}$ 旋回させた結果である。配列bの場合2球体の大きさが異なるので、 $180^{\circ}$ 旋回させると大小2球体の送受波器に対

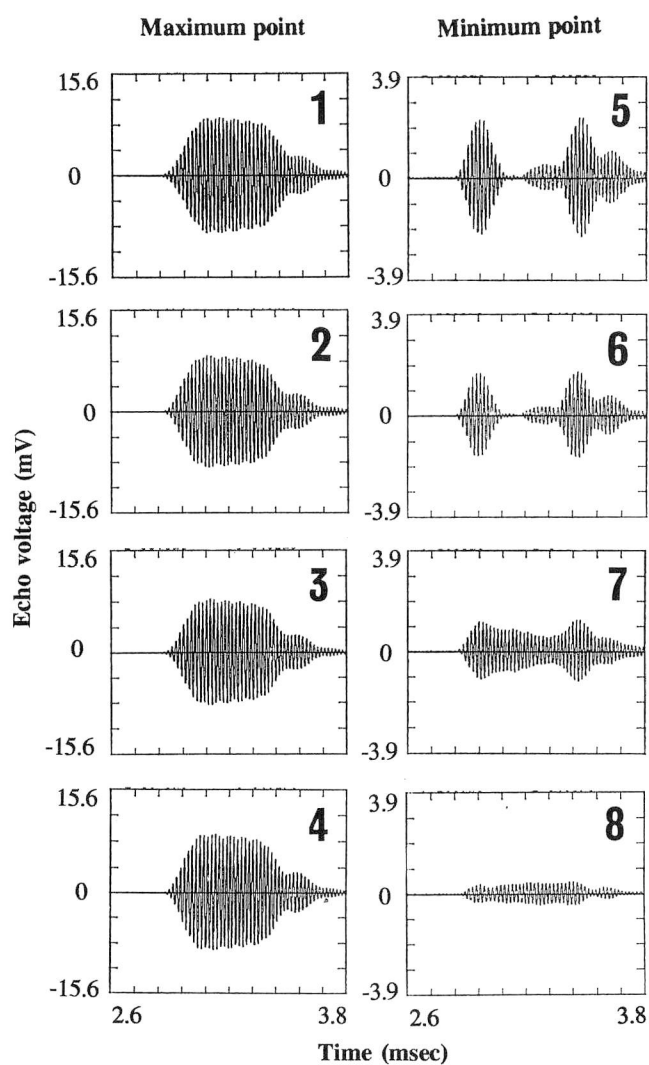


Fig. 2-5. Echo shapes when the pair of two balls of diameter 12.7mm is turned in horizontal plane.

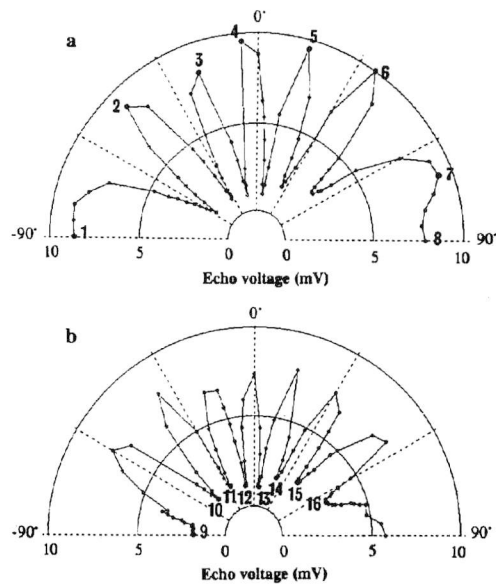


Fig. 2-6. The polar diagrams of the fluctuation of the reflected voltage when the pair of two balls of diameter 10.0mm and 15.9mm is turned in horizontal plane. a, Turning at the maximum point of the reflected voltage; b, Turning at the minimum point of the reflected voltage.

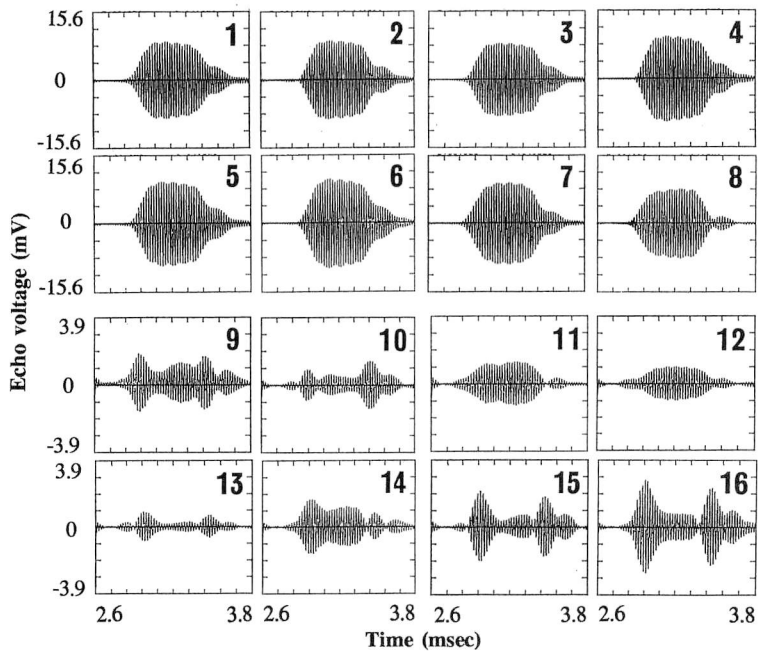


Fig. 2-7. Echo shapes when the pair of two balls of diameter 10.0mm and 15.9mm is turned in horizontal plane.

する前後関係が逆になる。 $-90^{\circ}$  のとき12.7mm球が送受波器に対して前方、 $90^{\circ}$  のとき15.9mm球が前方になる。このときの極大点1～8および極小点9～16の波形を Fig. 2-7 に示す。やはり極小点で波形は亜鈴型に大きく歪み、球体の大小関係も現れている。また亜鈴型の波形では前後にふたつのピークが現れるが、2球体の伝搬距離差が大きい方がピークの値も大きくなる傾向がある。

## 2.2 魚体および魚体模型の実験結果および考察

### 2.2.1 使用魚体と魚体模型

前節で2球体の干渉について基本的な現象を確認した。本節ではそれらに基づいて魚体の反射との関連を検討する<sup>57)</sup>。ターゲットには体長150mm、体高60mm、体幅25mmのマダイ *Pagrus major* とそのシリコンラバー製模型およびアクリル板模型の3種を用いた。シリコンラバー模型は魚体の形状が与える影響を検討するため、アクリル板模型は魚体と同じ投影面積を持つ平板として投影面積の影響を検討するためのモデルである。

シリコンラバー模型は測定した魚体からシリコンラバーで雌型をとり、硬化後シリコンラバーを充填して製作した。充填に際しては気泡の混入を防ぐため真空ポンプによる脱泡処理を行った。製作後軟X線撮影により確認したところ直径0.9mm以下の微小気泡が3個認めら

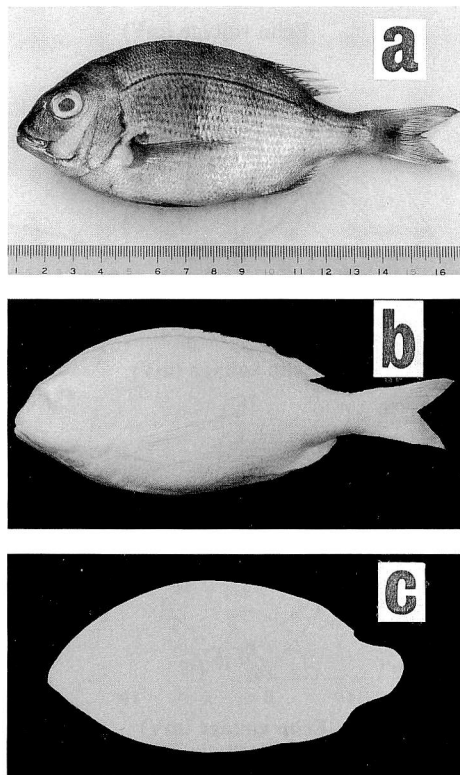


Fig. 2-8. *Pagrus major* and its life-sized models. a, *Pagrus major*; b, Model fish of silicone rubber; c, Model fish of acrylic board.

れたが測定結果に与える影響は無視できるものとする。シリコンラバーは表面張力が小さく細部にまで浸透して硬化するため鱗などの微細な凹凸も忠実に再現されている。アクリル板模型は厚さ 3 mm のアクリル製平板を、鰭を除いた魚体の投影形状に切り出して製作した。魚体および 2 種の模型を Fig. 2-8 に示す。

ターゲットの回転は、変動幅が大きく特徴をとらえやすい、という点から投影面積が最大となる側方入射を含む Yaw plane で行った。

### 2.2.2 反射指向性パターンの比較

Fig. 2-9 の a はマダイ、b はシリコンラバー模型、c はアクリル板模型の反射指向性パターン

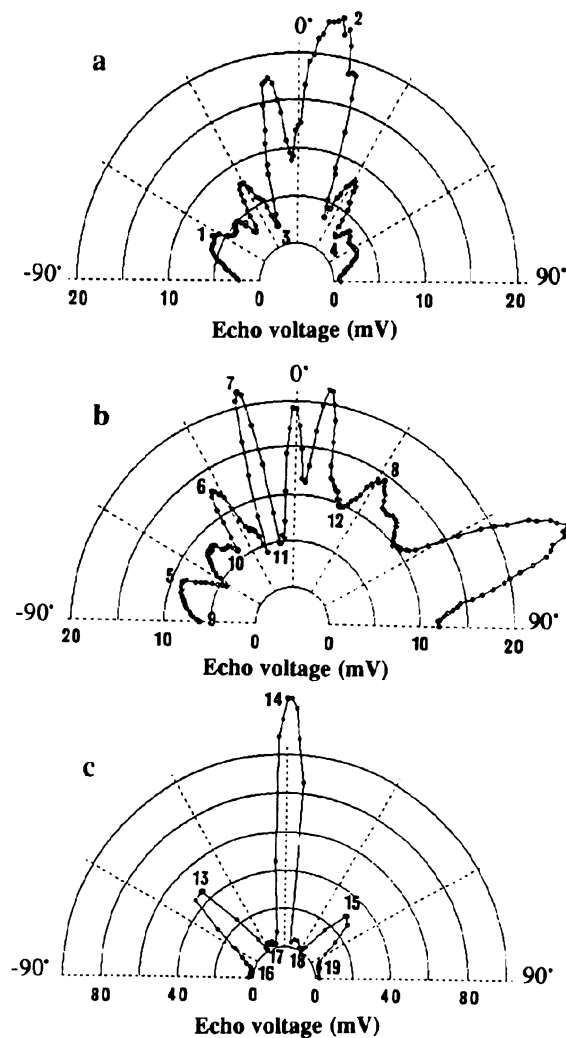


Fig. 2-9. The polar diagrams of the fluctuation of the reflected voltage when an individual fish rotated about its dorsiventral axis (Yaw plane). a, *Pagrus major*; b, Model fish of silicone rubber; c, Model fish of acrylic board.



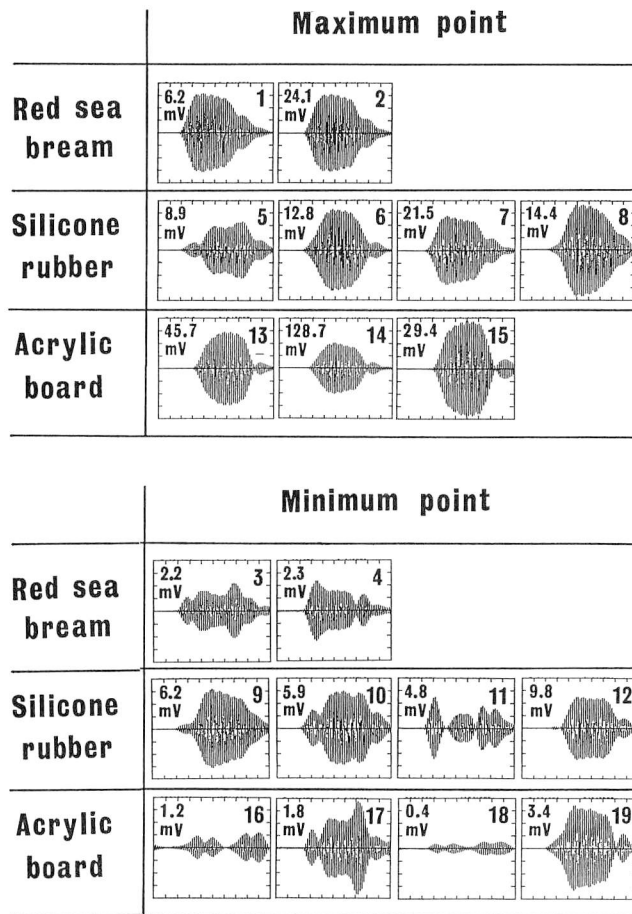


Fig. 2-10. Echo shapes at the maximum and the minimum points of the reflected voltage.

ンを示す。魚体は側方 $10^\circ$ 付近に極大が生じ、頭部および尾部に向かって周期的に極大極小を生じながら漸減する。内部が均質であるシリコンラバー模型は不規則で複雑なパターンを描く。極大点、極小点の角度にも規則性は少ない。特に主極が尾部付近に現れる点が魚体と異なる。アクリル板模型は $0^\circ$ に主極、 $\pm 45^\circ$ に副極があるだけの単純なパターンである。3者を比較してみると魚体の反射指向性パターンは内部の構造を考慮しない2種の模型とは大きく異なる傾向を示しており、反射指向性パターンの変動には形状のみならず内部構造が重要であることが示唆された。

### 2.2.3 反射波形の比較

Fig. 2-9 に示した極大点極小点番号に対応する波形をFig. 2-10 に示す。魚体の場合極大点における反射波形は、Fig. 2-1 に示した入射波形および1球体の反射波形と似た基本波形であり、極小点の波形はFig. 2-7 に示した大小2球体を回転させたときの垂鈴型波形に相似している。この場合頭部方向に小球体、尾部方向に大球体を配置した波形に近い。

アクリル板模型の極大点波形は立ち上がりが緩やかである傾向が見られた。極小点付近の波形は不規則に変化していた。シリコンラバー模型は両者の中間的な傾向を示していた。魚体は複雑な形状ではあるが魚肉や鰾を除く内臓などはその音響インピーダンスが海水に近いため、反射信号に対する寄与は小さいとされている。したがって骨格や鰾などの限られた要素からの反射波の合成で近似され、球体の実験結果と共通する傾向を示したと推察される。一方模型は内部が均質であるために外形の影響が強く現れ、球体の場合と異なる傾向を示したと推察される。

### 2.3 シミュレーションによる反射指向性パターンおよび反射波形

2 球体の反射における変動が2つの基本波形の重ね合わせだけでどの程度説明し得るかを検討するために、コンピュータによる反射波形合成のシミュレーションを行った。設定条件は以下の通りである。

サンプリング周波数	409.6kHz,	サンプリング点数	512個
搬送波中心周波数	49.6kHz,	水中音速	1,519.4m/sec

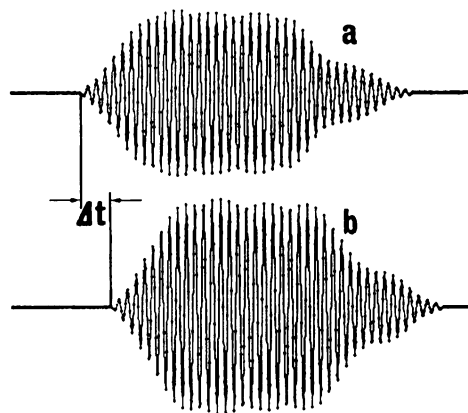


Fig. 2-11. Echo shapes generated by computer simulation. a, The echo shape of diameter 10.0mm; b, The echo shape of diameter 15.9mm;  $\Delta t$ , Time difference.

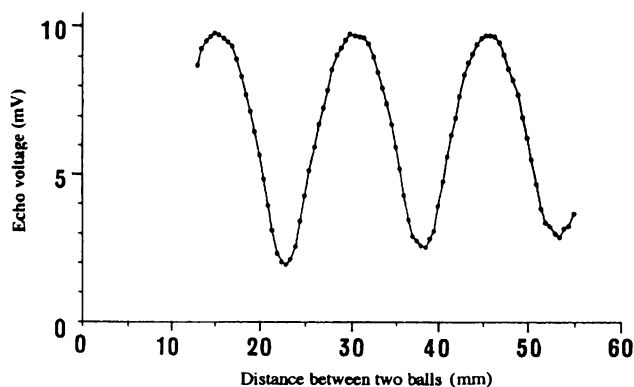


Fig. 2-12. The simulated fluctuation curve of reflected voltage when the distance between two balls of diameter 10.0mm and 15.9mm is changed on the acoustic axis.

各球体1個の反射波形の包絡線形状は実測波形から読みとり、搬送波周波数で変調することにより基本波形を形成した。Fig. 2-11のaに10mm球、bに15.9mm球の例を示す。以上の条件から振幅、個数、時間差を任意に設定し、合成表示するプログラムを作成した。Fig. 2-2配列b（前方に10mm球、後方に15.9mm球）の条件で振幅の変化をプロットした結果がFig. 2-12で、全体の傾向はよく再現されている。

Fig. 2-13はシミュレーションによって得られた波形の例である。aは極大点の一例でありすべて同様の波形となる。bは12.7mm球2個、cは前方に10mm球および後方に15.9mm球、dはcの前後を逆に設定した場合の極小点の波形である。これらは実際の2球体の反射波形の観察から得られた結果と符合し、高い再現性が得られた。

次にマダイの反射指向性パターンの周期性に着目し、パターンの変動周期が近似するようパラメーターを与えて、大きさの異なる2波形の合成をシミュレートした。魚体のパターンは最大値が $0^\circ$ となるようシフトし、2波形の振幅比はFig. 2-10の極小値番号3を再現するよう設定した。魚体の反射指向性パターンおよびその最大値で規準化したシミュレーションパターンをFig. 2-14に示す。2波形の振幅比は11:14、2音源間隔は45.6mmとなった。

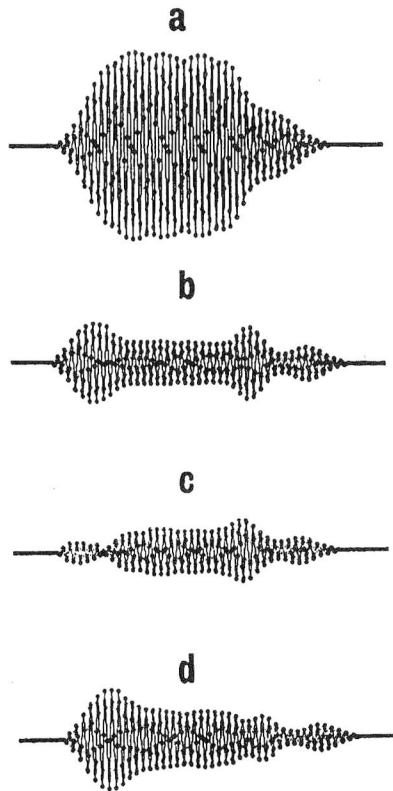


Fig. 2-13. Echo shapes by computer simulation. a, Echo shape at the maximum point of the reflected voltage by the pair of two balls; b, Echo shape at minimum point of the reflected voltage by the pair of two balls of the same diameters; c, d, Echo shapers at the minimum point of the reflected voltage by the pair of two balls of the different diameters; c, When the small ball is nearer to the transducer; d, When the large ball is nearer to the transducer.

反射振幅には大きな違いが現れるが、極小点の現れる角度はよく一致しておりパターン変動の周期性は再現されている。

両者の波形の代表例を Fig. 2-15 に示す。図中央の極小点波形はパラメーターの決定に使用したものであるが反射源の大小関係が逆転する位置の波形（右側）もよく似た波形になり、魚体の反射波形の変動を単純な干渉モデルで近似できる可能性を示唆している。

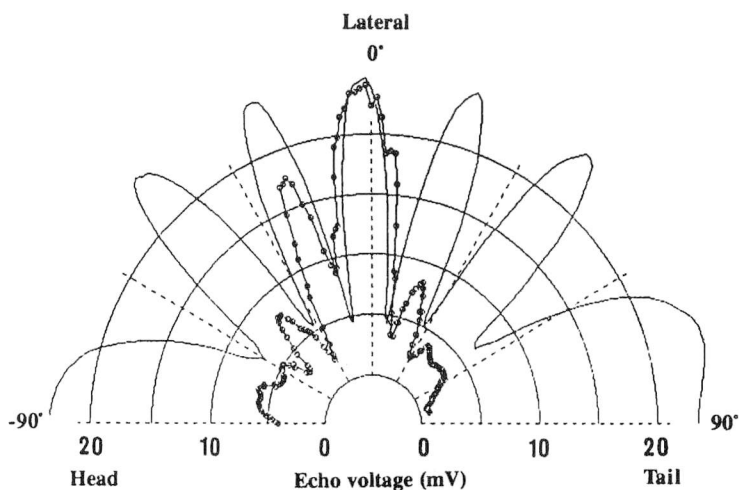


Fig. 2-14. The polar diagram of the reflected voltage by the *Pagrus major* and by its simulation. —○—, Observation; — — —, Simulation.

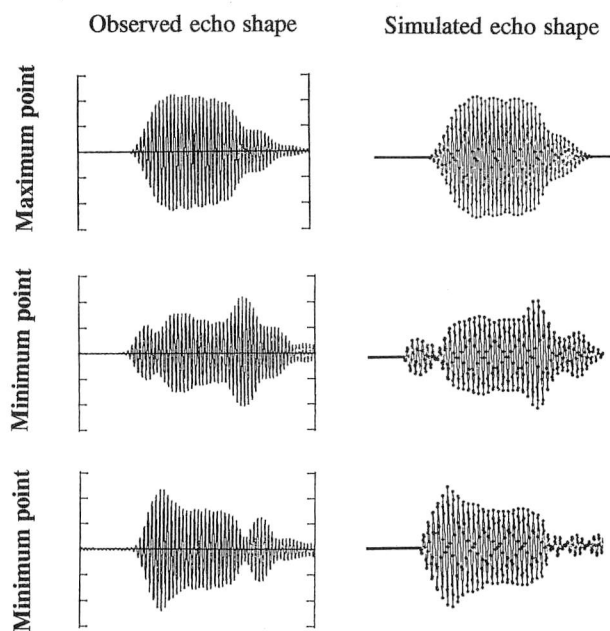


Fig. 2-15. Comparison of the observed pulse shapes of the *Pagrus major* and the simulated pulse shape.

Fig. 2-16 はマダイの内部構造を確認するために撮影した実寸の軟X線写真である。鰾の長さは約50mmであるが、鰾自体の反射特性は古澤<sup>58)</sup>が明らかにしているように本実験の $L/\lambda$ ではブロードな特性を持つと考えられる。したがって本実験にみられる反射指向性パターンの大きな変動は、鰾と、鰾の反射中心から約45mm離れた点に反射中心を持つ別の反射源との干渉による影響である、と考えると現象解釈的な説明が可能である。実験魚体の場合、鰾と頭蓋骨の距離と位置関係がこの条件にほぼ該当する。

この例だけから一般的な特性を論じることはできないが、魚体の構造と反射指向性パターンおよび反射波形の変動に関連のあることが確認された。

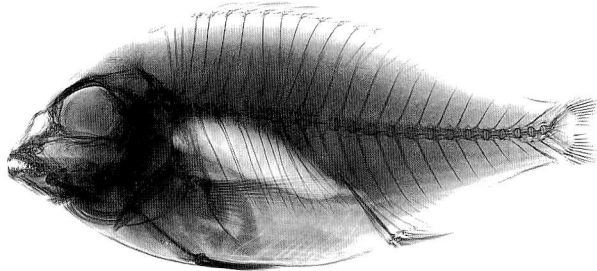


Fig. 2-16. SOFTEX photograph of the *Pagrus major*.

## 2.4 フィールドでの球体および単体魚の実験結果および考察

### 2.4.1 フィールド実験の概要

前節までに述べた諸現象は実験水槽におけるものであり、フィールドとは著しく異なる環境下で得られたものである。水槽実験に関しては1.1節で述べたように過去の実験例にならって十分な検定を行ったが、これらはTSの測定を目的とする反射レベルの測定の観点からなされたものであり、反射指向性パターンや波形の変動については十分考慮されてはいない。そこで1次実験で定性的に認められた現象を、大きな伝搬距離が得られるフィールドで確認するために、2次実験として北海道倶多楽湖における2種の実験を行った。実験内容は水深20m、30mでの懸垂法による球体および魚体の測定と、低速での航走による自然遊泳状態の単体魚の測定である。ただし時間・器材等の制約があり基礎的な段階にとどまった。

### 2.4.2 懸垂法による反射指向性パターン

直径38mmの2球体を間隔50mm、100mmで水深30mに懸垂し、2球体が音軸に垂直に並ぶ状態を $0^\circ$ として $\pm$ 約 $50^\circ$ 回転させた結果をFig. 2-17、およびFig. 2-18に示す。これらはTVGアンプによる伝搬減衰補正と、2乗検波の過程を経た包絡線信号を低速サンプリングし、パーソナルコンピュータのCRTに表示して写真撮影したものである。図は左側が水面、右側が湖底方向である。水面側のエコー像はターゲット支持のための約1mの鉄製シャフト、湖底側の規則的に変化するエコー像が2球体である。

表示aは通常のカラールーペースキャンと同様の表示法であり、1 pingが1走査線に対応し、下から上に向かって時間経過を表している。表示bは横軸に深度、高さが反射電圧、奥行きが前から後ろに向かって時間経過を表している。いずれも左側が水面、右側が湖底の方向

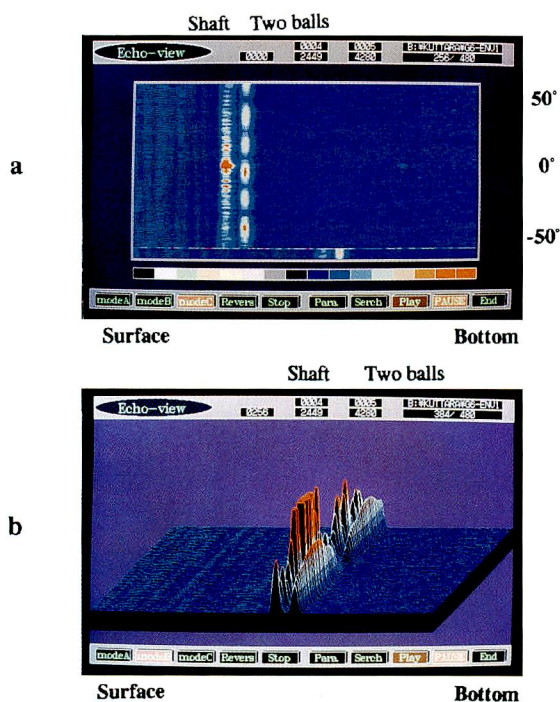


Fig. 2-17. Computer displayed image photographs of two balls separated by a distance of 50mm. a, Echogram of two balls (38mm); b, Represented image of two balls in 3D coordinate. Horizontal axes is depth in water, height axes is amplitude of echo, and depth axes is elapsed time.

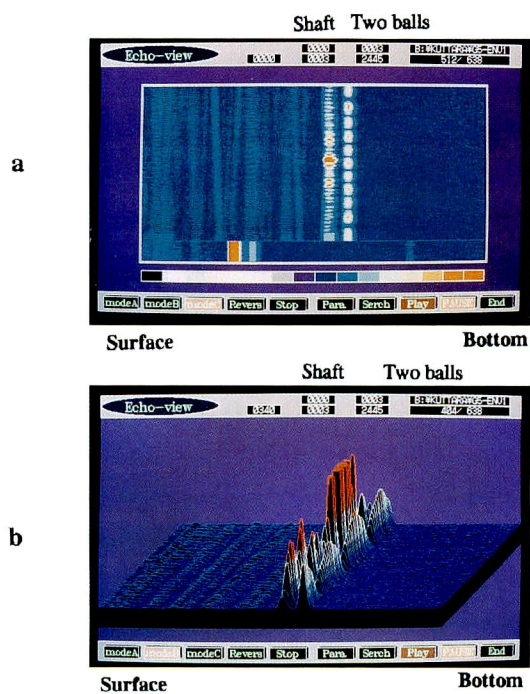


Fig. 2-18. Image photographs of two balls separated by a distance of 100mm represented in the same way as Fig.2-17.



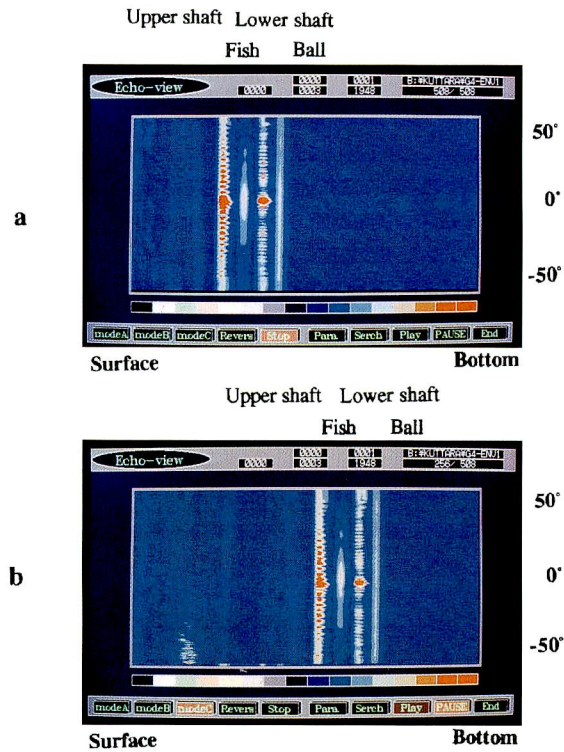


Fig. 2-19. Echograms of *Oncorhynchus nerka* in dorsal aspect. 2nd echo is fish. 1st. and 3rd echo are supporting shafts. 4th echo is iron ball using calibration.

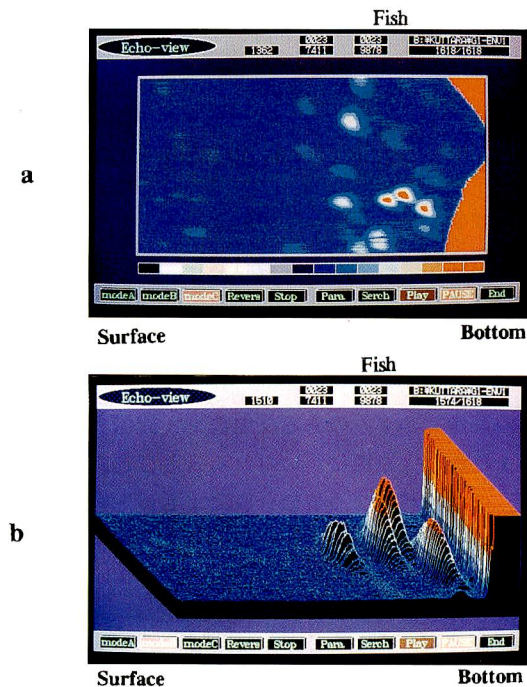


Fig. 2-20. Image photographs of *Oncorhynchus nerka* in situ represented in the same way as Fig. 2-17.

である。振幅はターゲットの反射振幅を目安に8色で表示した。表示色と反射振幅の関係はa, b図で対応している。これらには2球体の干渉による規則的な変動が現れており、水深20mで行った測定も同様の結果が得られた。この結果から2球体の干渉による反射指向性パターンの変動は、伝搬距離の長いフィールドにおいても水槽実験と同様に起こることが確認できた。

Fig. 2-19は体長21cmの麻酔処理したヒメマスの背方向±約50°の測定結果である。測定水深はaが約20m, bが約30mである。写真下方が頭部約50°から、上方が尾部約50°からの入射である。映像は水面側から順に、上側支持シャフト、魚体、下側支持シャフト、校正用スチール球である。

このデータからはマダイの水槽実験で見られたような周期性のある大きな変動は読み取れないが、緩やかな起伏は認められる。振幅分解能の粗さ、魚種の違い、角度制御の精度差などがあるため、本実験の結果のみで単体魚における干渉の影響を判断することはできない。

#### 2.4.3 自然遊泳状態の単体魚のエコー記録

夜間、秒速1 m/sec以下の低速での航走によって得られたエコー記録の一例を Fig. 2-20に示す。倶多楽湖のヒメマスの観察によると夜間の運動は非常に緩慢でほとんど遊泳しないと考えられるが、観測されたエコー記録はこのように滑らかに変化するものと細かい変動を伴うものがある。同時に測定されるノイズレベルや湖底には差が認められないので両者の違いは船の進行方向に対する体軸の角度に起因するものと推定される。したがって自然遊泳状態の魚体からも干渉による変動を測定できる可能性が、不十分ながら確認できた。

本実験では波形の解析も行う予定であったが波形データが不安定で解析不能であった。今後の改善を期したい。

### 第3章 反射指向性パターンおよび反射波形の変動に関する理論的検討

1次、2次の観察実験およびシミュレーションの結果から、2球体のように単純な構造の反射体の反射指向性パターンの変動は、反射波形の合成に伴う干渉によって説明できた。魚体についても変動の周期性には2球体の場合と共通する傾向が見られた。そこで干渉の最も単純な状態である連続波の合成を理論的に整理し、反射指向性パターンの変動との関係を検討した。

また1次実験では極小値の近傍でひずみのある反射波形が観測された。この現象は連続波の合成では説明できない。また魚群探知機に用いられる音波は連続波ではなく、持続時間が有限であるパルス波である。そこでパルス波形の合成による波形の変動、という点について理論的に検討した。

#### 3.1 連続波の合成

##### 3.1.1 2連続波の干渉理論の背景

角振動数 $\omega$ 、時間 $t = 0$ で振幅が $A$ である余弦波に、初期位相 $\phi$ が与えられる場合の瞬時



値  $P_0$  は

$$P_0 = A \cos(\omega t + \phi) \quad (3-1)$$

振幅が等しく  $A$  であり位相が  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  である周波数  $\omega t$  の 2 つの波の合成波の瞬間値  $P$  は

$$P = 2A \cos \frac{\phi_1 - \phi_2}{2} \cos \left( \omega t + \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} \right) \quad (3-2)$$

となる。これは周波数は不変，位相は両者の平均位相，振幅は位相差の関数で表されるひとつの波となることを示している。合成振幅は位相差に応じて 0 から  $2A$  の間で変化する。

両者の振幅が異なる場合にも同様の結果となる。振幅を  $A_1$ ,  $A_2$  とし複素数表記すると

$$P = A_1 e^{i(\omega t + \phi_1)} + A_2 e^{i(\omega t + \phi_2)} = \left( A_1 e^{i(\omega t + \phi_1)} + A_2 e^{i(\omega t + \phi_2)} \right) e^{i\omega t} \quad (3-3)$$

合成ベクトルの絶対値を  $A_R$ ，合成位相を  $\phi_R$  とおけば (3-3) 式は

$$P = A_R e^{i\phi_R} e^{i\omega t} \quad (3-4)$$

と表され，合成振幅  $A_R$  は

$$A_R^2 = \left( A_1 e^{i\phi_1} + A_2 e^{i\phi_2} \right) \left( A_1 e^{-i\phi_1} + A_2 e^{-i\phi_2} \right)$$

$$= A_1^2 + A_1 A_2 \left( e^{i(\phi_1 + \phi_2)} + e^{-i(\phi_1 + \phi_2)} \right) + A_2^2$$

$$A_R^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos(\phi_1 - \phi_2) \quad (3-5)$$

となる。位相差  $\phi_1 - \phi_2$  を含む項が干渉項である。位相差が  $0^\circ$  のとき

$$A_R = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2} = A_1 + A_2 \quad (3-6)$$

となって合成振幅は個々の振幅の和となり，位相差が  $180^\circ$  のとき

$$A_R = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - 2A_1 A_2} = |A_1 - A_2| \quad (3-7)$$

となって個々の振幅の差となる。個々の振幅が等しい場合，異なる場合の位相差と振幅の関係を Fig. 3-1 に示す。図中右側の数値は両者の振幅比を表す。図のように合成振幅は個々の振幅の差（極小値）から和（極大値）の間を位相差に応じて規則的に変動することになる。本論文では反射指向性パターンにみられるこのような規則的な変動を“振動”と呼ぶ。また極大・極小の繰り返し数を“振動数”，その周期を“振動周期”と呼ぶ。

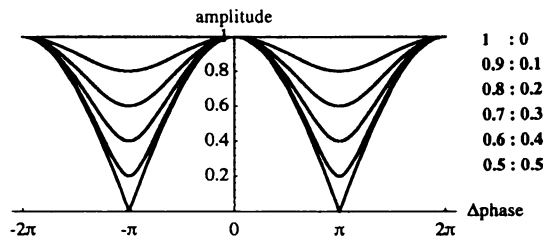


Fig. 3-1. Variation of composite amplitude by two reflecting object in phase difference. Amplitude ratio are 1:0~0.5:0.5.

### 3.1.2 反射指向性パターンの振動と2球体間隔

間隔を固定した2球体が $180^\circ$ 回転するときの反射指向性パターンの振動と2球体の間隔について検討する。

2連続波の合成では(3-2)式および(3-4)式に示したように合成波は新しい振幅と位相をもち周波数は変化しないひとつの波として観測される。

送受波器とターゲットの距離Dが反射音源間の間隔dより十分大きいとき、入射角を $\theta$  (伝搬距離が等しく、音軸に対して2音源を結ぶ線が直角の状態が $0^\circ$ )とする。このとき伝搬距離差 $\Delta D$ は、往復の経路を考慮して

$$\Delta D = 2d \sin \theta \quad (3-8)$$

となり、入射角の正弦に比例する。Fig. 3-2にこの関係を示した。入射角を、音源が音軸上に並ぶ状態( $-90^\circ$ )から横並び( $0^\circ$ )を経て逆位置で音軸上に並ぶ状態( $90^\circ$ )まで変化させる。このとき伝搬距離差の変化量は、

$$\begin{aligned} \Delta D_{90^\circ} - \Delta D_{-90^\circ} &= 2d \sin 90^\circ - 2d \sin -90^\circ \\ &= 4d \end{aligned} \quad (3-9)$$

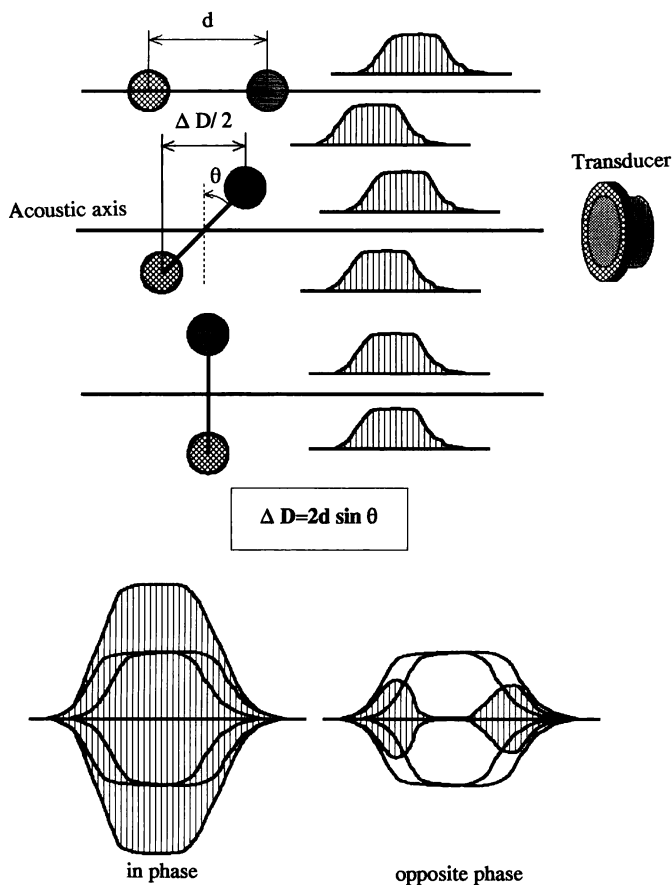


Fig. 3-2. Schematic diagram showing relation between difference in propagation distance ( $\Delta D$ ) and distance of two balls ( $d$ ).

となる。極大または極小は伝搬距離差が波長の整数倍となるごとに繰り返されるので、波長を  $\lambda$ 、この間の反射指向性パターンの振動数を  $N$  とすると

$$N = \frac{4d}{\lambda} \quad (3-10)$$

となる。したがって  $N$  を測定、あるいは推定できれば (3-10) 式によって  $d$  を推定できることになろう。

### 3.2 パルス波形の合成

#### 3.2.1 パルス包絡線の形状

周波数が等しく定常的な 2 連続波の合成では、合成波も常に定常波となりひとつの振幅と位相を持ち周期は変動しない。したがってドプラー効果による周波数のシフトや音波伝搬における非線形効果などを考えない限り波形の変動は起こらない。一方 1 次実験ではそれらの特殊な効果は除外できる条件であるにも関わらず観測される波形には大きな歪みが見られた。この現象は合成される波形がパルス状に変調された波形であることに由来すると考えて以下の検討を行った。

ハイドロホンで得られる入射波形や 1 球体の反射波形などの基本波形の包絡線を時間関数  $W(t)$  とおく。 $W(t)$  は立ち上がり、立ち下がりがなだらかに変化し中央部が定常な波形である。ここでは  $W(t)$  を理論的に定義することを目的としないので、このような波形の特徴だけを定めておく。 $W(t)$  に対して遅延時間  $t_d$  だけ遅れた同形の波形  $W(t-t_d)$  が存在するとき、この 2 者の合成は Fig. 3-3 のように表される。図において区間 I と V は波形が重ならない非合成区間、区間 III は両者の定常部分が重なる定常合成区間、区間 II と IV は合成される部分に立ち上がり・立ち下がりの非定常な部分がある過度区間と呼ぶ。

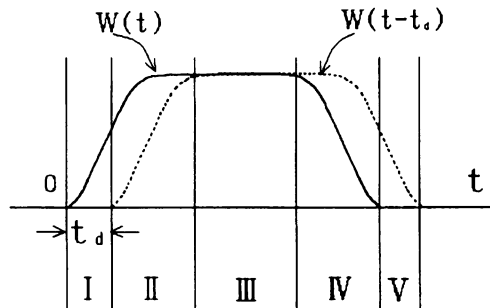


Fig. 3-3. Schematic diagram showing two envelopes of echo pulses overlapping with delay time  $t_d$ .

両者の同位相の場合、振幅は両者の和となり極大値となるが波形全体の特徴は変わらない。両者の位相が  $180^\circ$  異なる場合には、非合成区間は基本波形と同形であるが、定常合成区間では両波形が打ち消しあって振幅は 0 となる。過度区間ではこの両者を滑らかに接続するように変化する。その結果区間 I、II および区間 IV、V にピークをもつ 2 つの小波形に分離し、1 次実験で観察された垂鈴型の波形が現れる。以上の 2 波形を典型として位相差に応じて波形が変化する。したがって波形の変動から波形の合成にともなう干渉の影響を推定できるこ

とが示唆される。

### 3.2.2 局所的な搬送波周期の変動

反射波形の変動は目視によれば明瞭に観察されたが、この情報から干渉の影響を推定するためには反射波形の形状の違いを示す代表値が必要である。そこで1次実験で反射波形内のモアレ模様の変化として観察された、搬送波周期の微小な変動に注目した。

搬送波を初期位相  $0^\circ$ 、周波数  $\omega$  の正弦波  $\sin(\omega t)$  とすると、Fig. 3-3 に示す  $W(t)$  を包絡線とする原波形の瞬時値  $p_1$  は

$$P_1 = W(t) \sin \omega t \quad (3-11)$$

遅延時間  $t_d$  で同形の波形が存在するときその瞬時値  $p^2$  は

$$P_2 = W(t-t_d) \sin \omega(t-t_d) \quad (3-12)$$

このとき合成波形の瞬時値  $P_0$  は

$$P_0 = W(t) \sin \omega t + W(t-t_d) \sin \omega(t-t_d) \quad (3-13)$$

と表される。

ある時点  $t_N$  で  $p_0$  の振幅が0になったとすると (3-13) 式より

$$P_0 = \sin \omega t_N + \frac{W(T_N - t_d)}{W(T_N)} \sin \omega(t_N - t_d) = 0 \quad (3-14)$$

となる。ここで合成波形全体で搬送波の周期に変動がないと仮定すると、その周期は任意の時点で基本波形の搬送波周期  $T$  (const.) となるはずである。したがって  $t_N + T$  でも  $p_0$  の値は0となって次式が成り立つ。

$$\left( \frac{W(T_N - t_d + T)}{W(T_N + T)} - \frac{W(T_N - t_d)}{W(T_N)} \right) \sin \omega(t_N - t_d) = 0 \quad (3-15)$$

(3-15)式は波形が重ならない非合成区間 (Fig. 3-3の区間IとV)、および  $W(t)$  が一定である定常合成区間 (区間III) で常に成り立つ。しかし波形が重なり合いかつ  $W(t)$  の値が一定でない過度区間 (区間IIとIV) においては、遅延時間  $t_d$  が  $T/2$  の整数倍以外では0にならない。この場合任意の時点の合成波周期を  $T$  (const.) とした仮定は棄却され、2波形の搬送波の位相差および両者の  $W(t)$  の差に応じ、合成波では  $T$  以外の周期が現れることになる。これは概念的には以下のように簡単に説明できる。

振幅が等しい2つの理想パルス波形の合成は3区間に分割される。すなわち初期非合成区間、定常合成区間、終期非合成区間である。Fig. 3-4にこれらの関係を示す。aは同位相の場合、bはほぼ逆位相の場合、cはbの区間接続点を拡大したものである。3区間内の搬送波周期は等しく、位相は非合成区間がそれぞれの位相、定常合成区間が両者の平均位相となる。区間接続点においては前後の区間に位相差が存在するため、接続点を含む1周期だけが異なった値になり搬送波周期に不連続が起きる。b, c図におけるハッチングの部分が不連続区間であり、“なまり”のある実際の波形の合成では過度区間全体にこの不連続がひろがって搬送波周期の変動が起きる。

この変動を波形データから測定することができれば干渉の状態を知ることができる。すなわちある振幅の1波形を観測したときに、小さな振幅の反射が同位相で合成されたものか、大きな振幅の反射が逆位相で合成されたものか、周期の変動を考慮すれば推定が可能となる

う。

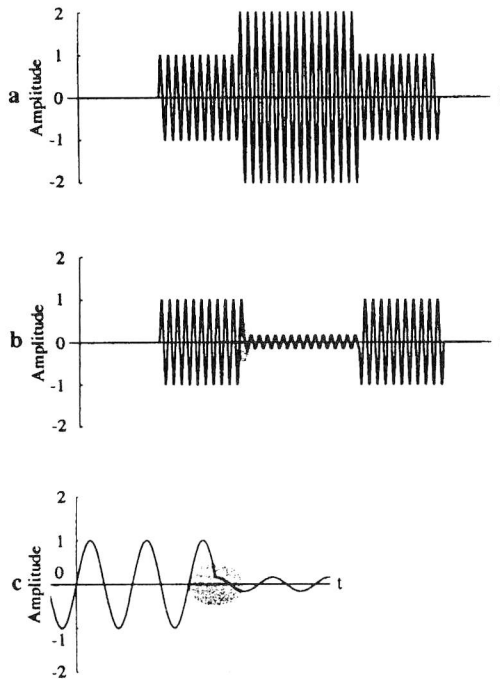


Fig. 3-4. Schematic diagram showing composition of two ideal pulses. Amplitude of two pulses are 1.0. a, In phase condition; b, Nearly opposite phase condition; c, Magnifying time scale of b; Hatching area in b, c showing discontinuity interval of wavelength.

#### 第4章 2球体の反射指向性パターンと反射波形の変動の解析<sup>59)</sup>

第3章で2球体の反射指向性パターンと反射波形の変動について理論的な検討を行った。その理論を検証するために、3次実験として自動測定システムを開発し、2球体の精密な測定と解析を行った。実験には38mm球2個を用い、2球体間隔を固定して180°回転させたときの反射指向性パターンを1°刻みに測定した。2球体の中心を結ぶ直線が音軸に一致する状態（-90°）から、音軸と直角に交わる状態（0°）を経て、再び音軸に一致する状態（+90°）まで180°水平に回転させた。

本章では、自己相関係数曲線から反射指向性パターンの振動数を求め、3.1節で理論的に示した方法で球体間隔を推定した結果を述べる。また3, 2節では1次実験で観察された反射波形と搬送波周期の変動が理論的に起こり得ることを示した。そこで2球体の波形データから周期の変動量の計測を試みた。

##### 4.1 2球体の反射指向性パターンの変動と反射音源間隔

###### 4.1.1 2球体の反射指向性パターン

Fig. 4-1 に2球体間隔50mmの場合 a, 2球体間隔100mmの場合 b, 1球体の場合 c, の各反

射指向性パターンを示す。通常、反射指向性パターンの表示には極座標表示または直交座標表示のいずれかが用いられるが、本論ではパターンとして感覚的にとらえる場合には極座標を、変動の大きさや周期を量的にとらえる場合には直交座標を用いる。

2 球体の反射振幅は極大値付近で 1 球体の場合の約 2 倍になっているが、周期的に急激に減少し振動する。振動の極は球体間隔が大きい  $b$  に多く現れる。これらは、反射指向性パターンの変動が搬送波の位相差に起因しており、位相差の原因である伝搬距離差が  $\lambda/2$  の奇数倍となる状態でエコーが打ち消しあっている、と推定した 1 次実験の観察結果 (2.1 節) と合致する。また  $0^\circ$  付近では振動周期が短く、 $\pm 90^\circ$  に近づくにしたがって振動周期は長

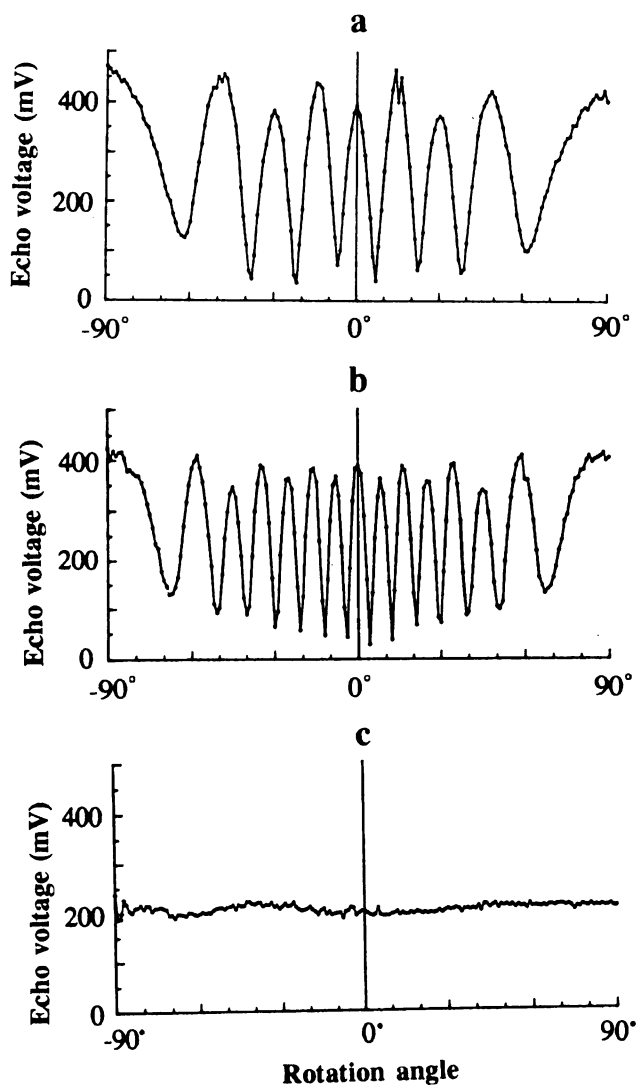


Fig. 4-1. Reflecting patterns of balls. a, Two balls separated by a distance of 50mm; b, Two balls separated by a distance of 100mm; c, One ball.

くなっている。これは(3-8)式で示したように、伝搬距離差が入射角の正弦に比例するためである。

#### 4.1.2 反射指向性パターンの座標変換

反射指向性パターンの振動数を求めるためには様々な方法が考えられる。極大値または極小値の個数を計数するのは最も単純な方法である。しかし測得データには不規則成分も含まれ、極小・極大を客観的に決めるのは困難である。また結果が整数値に丸められることも正確な振動数を求める上で問題がある。そこで反射指向性パターンの変動を時系列変化とみなして自己相関係数曲線を計算し、振動周期と振動数を求めた。

反射指向性パターンの振動数はこれまでの検討から伝搬距離差に依存することが明らかである。しかし測得データは入射角度 $\theta$ について等間隔に測定されたものであり、変動周期を求めるためには伝搬距離差について等間隔に測定されたデータ系列が必要である。往復の伝搬距離差 $\Delta D$ は、(3-8)式で表されるように入射角 $\theta$ の正弦に比例する。そこで測得データを1次補間し、 $\sin \theta$ の値が等間隔となるようにサンプリングしなおした。ここで1次補間を用いたのは原データが極小点以外では滑らかに変化していることと、鋭角的に現れる極小点の特徴を残すためである。データ点数は計算の便宜上512点とした。この操作によって伝搬距離差が等間隔であるデータ系列 $X_k \{k: 0, 1, \dots, 511\}$ が得られる。以後このデータ系列を $\{X_k\}$ で表す。

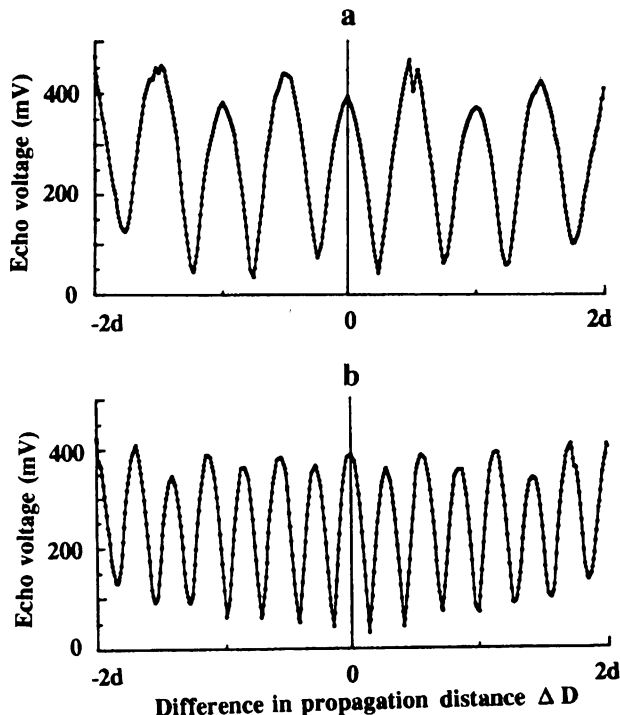


Fig. 4-2. Results of transformation to distance coordinate from angular coordinate.

2 球体の反射指向性パターン (Fig. 4-1 の a, b) から得られた  $\{X_k\}$  を Fig. 4-2 の a, b に示す。図の横軸は入射角 ( $\pm 90^\circ$ ) の正弦と考えれば  $\pm 1$  であり,  $\pm 90^\circ$  の回転によって生ずる伝搬距離差と考えれば, (3-9) 式からその範囲は  $\pm 2d$  となる。どちらを用いても振動数は同じ値になるが, ここでは  $\pm 2d$  の表示を用いる。

#### 4.1.3 自己相関係数による球体間隔の推定

自己相関関数  $C(\tau)$  は通常時系列関数  $x(t)$  に対し, ラグ  $\tau$  の関数として次式で定義される。

$$\begin{aligned} C(r) &= \overline{x(t)x(t+\tau)} \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t)x(t+\tau) dt \end{aligned} \quad (4-1)$$

本論で扱うのは伝搬距離差  $\Delta D$  の関数であるが連続系の表式としては (4-1) 式との関連を考慮して  $x(t)$ ,  $\tau$  を用いる。 $\{X_k\}$  は  $x(t)$  をサンプリングしたものであり, 周期  $T = 4d/512$  の  $\delta$  関数列  $\delta_s$  を利用して表すと

$$\begin{aligned} \{X_k\} &= x(t) \delta_{st} \\ &= \sum_{n=0}^{511} x(nT) \delta(t-nT) \end{aligned} \quad (4-2)$$

となる。(4-2) 式は連続系の表式と離散系の表式を結び付けるものである。実際に測定されるのは離散データ系列であるから, 以後の展開は離散系の表式を中心に行う。なお, 本論で用いる用語は日野<sup>60)</sup>によるものである。

離散系の自己相関は

$$R_k = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m x_{m+k} \quad (4-3)$$

によって計算される数列  $R_k$  となる。(4-3) 式から  $\{X_k\}$  の自己相関は

$$\{R_k\} = \frac{1}{512} \sum_{m=0}^{511} x_m x_{m+k} \quad (4-4)$$

となる。 $m+k$  が与えられた  $m$  の範囲 ( $0 \leq m \leq 511$ ) を超える場合には  $\{X_k\}$  が巡回的に繰り返すと考えて  $m+k$  を  $m+k-512$  とする。



自己相関を  $R_0$  で除して無次元化したものを自己相関係数系列  $\{r_k\}$  とする。 $\{r_k\}$  は

$$\{r_k\} = \frac{\sum_{m=0}^{511} X_m X_{m+k}}{\sum_{m=0}^{511} X_m^2} \quad (4-5)$$

となる。

2 球体の反射指向性パターンの  $\{r_k\}$  を Fig. 4-3 に示す。a, b はそれぞれ球体間隔 50mm, 100mm の結果である。図の横軸 (lag) は球体間隔  $d$  との比で表された伝搬距離差であり, この値が搬送波長  $\lambda$  の整数倍に等しいとき自己相関係数が極大となる。 $\{r_k\}$  の極大値はいずれもほぼ 1.0 となり lag が大きくなってもほとんど減少しない。したがって伝搬距離差について規則性の強い変動であることがわかる。

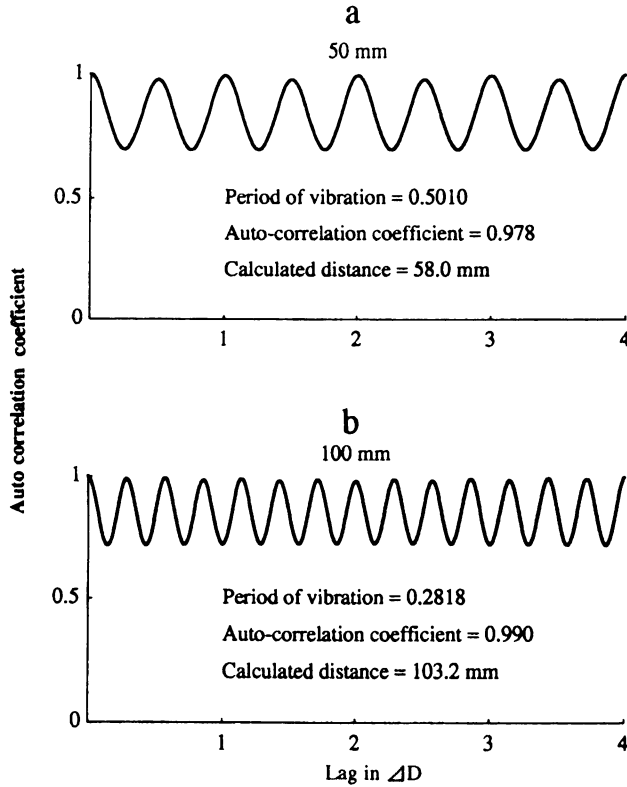


Fig. 4-3. Auto-correlation curves of two balls reflecting pattern. a, Two balls separated by a distance of 50mm; b, Two balls separated by a distance of 100mm.

$\{r_k\}$  の 1 番目の極大値から基本周期  $\tau$  を得れば, 振動数  $N$  は

$$N = \frac{4}{\tau} \quad (4-6)$$

となり,  $N$  を (3-10) 式に代入すると  $d$  は

$$d = \frac{\lambda}{\tau} \quad (4-7)$$

となる。波長 $\lambda$ は Mackenzie<sup>61)</sup>の音速式で求めた清水中の音速1,454m/secから29.08mmとした。基本周期, 自己相関係数, (4-7)式による球体間隔計算値を Fig. 4-3 の図中に示した。

球体間隔100mmの場合は自己相関係数が高く計算値も設定間隔に近似したが, 球体間隔50mmの場合は自己相関係数がわずかに低くなり, 計算値の誤差も増加した。これは球体間隔が小さいために多重反射などの影響が現れたことによると推定される。

以上の結果, 反射音源が2個の場合には, 反射指向性パターンの変動周期から自己相関を利用して反射音源間隔を推定できることが確認できた。

通常魚群探知機の距離分解能はパルス長の1/2であり, パルス長1 msecの場合750mmとなる。本実験ではこの値よりはるかに近い距離に分布する反射体でも反射指向性パターンの変化を解析することにより分解できる可能性があることが示唆された。

## 4.2 2球体の反射波形の変動

### 4.2.1 搬送波の周期変動の計測方法

振幅が変化する波の周期を直接計測するには振幅が0となる時間をトレースするのが単純な方法である。今回使用した波形解析装置のサンプリング周波数は256kHzであり, 50kHz搬送波1周期内のサンプル数は5.12個, 時間軸分解能は3.9 $\mu$ secとなる。パルス長は1 msecなので1パルス内の波の数は50個であり, この間位相が180°変化したとしても周期の平均変化量は0.2 $\mu$ secである。したがって今回用いた計測システムでは周期の変動を直読することはできない。しかし波形の目視観測において, サンプリング周波数と搬送波周波数の干渉によって生ずるモアレ模様の変動が明瞭に観察され, 搬送波周期の変動が推定された。そこでこの現象を利用して以下に述べる方法で搬送波周期の変動を測定した。

Fig. 4-4はこの方法の説明図である。まず時間軸精度が高い信号処理装置のA/Dコンバーターのクロック(256kHz)を利用して, 搬送波(50kHz)の電圧値が負から正に変化する点(以後ゼロクロス点と呼ぶ)のクロック上の位相を求め, クロック位相角 $\psi$ とする。ゼロクロス点のクロック位相角 $\psi$ は直読する事ができないので, ゼロを挟む両サンプルポイント

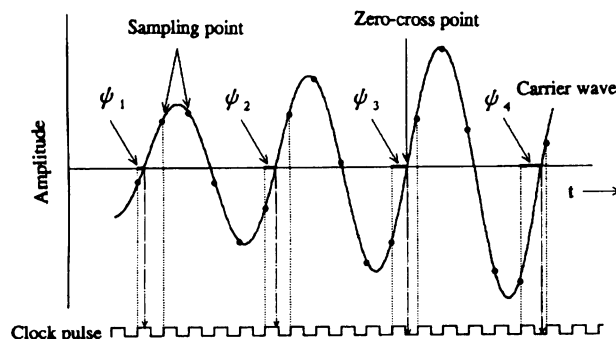


Fig. 4-4. Schematic diagram showing measurement method of the phase angle ratio ( $\psi$ ).

での値で間を1次補間し、比例配分で近似的に求めた。搬送波の周期に変動がなければ図中の $\psi$ は規則的に変化し、その変化量 $\psi_n - \psi_{n-1}$ は常に一定の値となる。ここで変化量を $\Delta\psi$ 、計測時間 $\kappa$  sec内の $\Delta\psi$ の積算値を $\Delta\psi_{\text{sum}}$ とすると、その値が変化するという事はモアレ模様に変化すること、すなわち $\kappa$  sec内の搬送波の周期に変化が生じることを意味する。

クロック周波数を $f_0$ 、搬送波周波数を $f_1$ 、 $n$ 番目のゼロクロス点のクロック位相角を $\psi_n$ とすると、ゼロクロス点の個数 $N_z$ は

$$N_z = [\kappa f_1] \quad (4-8)$$

となる。ただし $[\ ]$ はガウス記号で $[\ ]$ 内の数値の整数部を表す。

また $\Delta\psi_{\text{sum}}$ は

$$\Delta\psi_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^{N-1} (\psi_{i+1} - \psi_i) \quad (4-9)$$

となる。ここで $f_1$ が50kHzで変化しなければ搬送波1周期ごとの位相変化量は1周期内のサンプル個数5.12の小数部0.12であるにしたがってこの場合の $\Delta\psi_{\text{sum}}$ は

$$\Delta\psi_{\text{sum}} = (N_z - 1) \left( \frac{f_0}{f_1} - \left[ \frac{f_0}{f_1} \right] \right) \quad (4-10)$$

で表される。

今回の解析で用いた $\kappa$ の区間は、最大振幅に対する50%立ち上がり点から0.5msecである。(4-10)式の $f_0$ 、 $f_1$ に256kHz、50kHzを代入すると $\Delta\psi_{\text{sum}}$ の値は2.88となる。観測波形から計測した $\Delta\psi_{\text{sum}}$ がこの値に近ければ搬送波周期の変動は小さく、差が生じるにしたがって周期が変動することを示すことになる。

#### 4.2.2 搬送波周期変動の計測結果

$\psi$ の計測の代表例をFig. 4-5に示した。**a**は1球体、**b**は2球体（球体間隔50mm）の極大点付近、**c**は2球体の極小点付近の代表的な反射波形を、各波形の最大振幅で基準化して示したものである。**a**は干渉のない場合、**b**は位相差が小さい場合、**c**は位相が逆位相に近い場合に相当する。波形の下のグラフはそれぞれの波形における各ゼロクロス点の $\psi$ の変化を図示したものである。反射波形の安定している**a**、**b**の $\Delta\psi_{\text{sum}}$ はそれぞれ3.08、3.19で計算値2.88に近い値であった。これに対し、**c**の $\Delta\psi_{\text{sum}}$ は1.35となり計算値との差が大きく、 $\psi$ の変化も前者に比較して不規則になる部分があり、ここで周期が変動していることを示している。

今回用いた方法は搬送波周波数とサンプリング周波数との干渉を利用する、という間接的な方法ではあるが、合成エコーの搬送波周期が部分的に変動することを明確に示すことができた。

次にFig. 4-6に1球体の場合**a**、球体間隔50mmの場合**b**、球体間隔100mmの場合**c**、の $\Delta\psi_{\text{sum}}$ を回転角 $1^\circ$ ごとに示した。それぞれFig. 4-1の**a**、**b**、**c**に対応している。縦の点線は反射指向性パターンの極小値が測定された回転角を示すが、 $\Delta\psi_{\text{sum}}$ の大きな変動域とよく

一致した。1球体および2球体の極大値付近の $\Delta\psi_{\text{sum}}$ の値は、周期に変動がないときの計算値2.88に近い値であった。

$\Delta\psi_{\text{sum}}$ は今回の実験データに即した指標値であり、サンプリングクロックに依存した値である。またゼロクロス点をトレースするのは処理手法としては簡単であるが振幅の小さい部分での精度が悪い。ひとつの波形データは総平均をベースラインとする相対振幅データの時系列であるが、このデータにはごく低い周波数の成分によるトレンドが残っている。そのため振幅の小さい部分ではベースラインは局所的な振幅の中央を通らず、局所的な搬送波周期の推定に誤差を生じる。しかもこの変動は、打ち消し合いの干渉が起き振幅が小さくなる波形で顕著に現れるはずである。したがって魚体の反射波形にも応用可能な汎用性のある手法を確立するには、トレンドの影響を受けにくい測定手法が必要である。

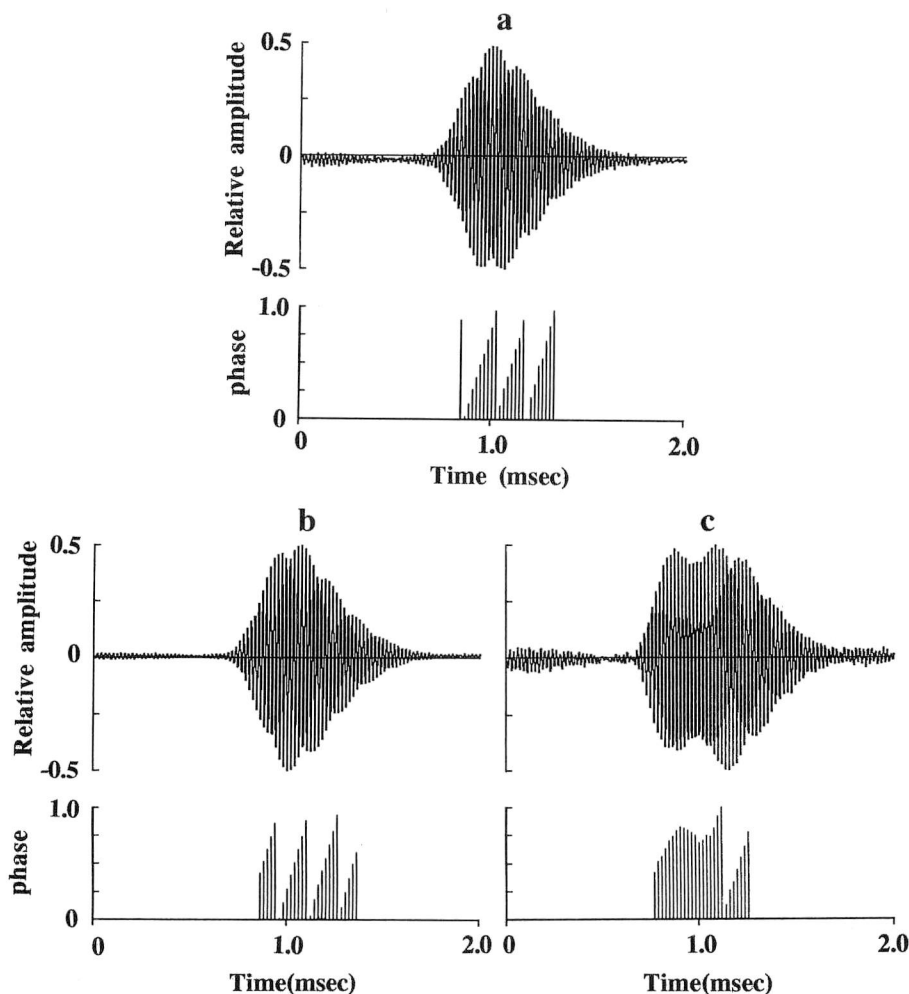


Fig. 4-5. Example of pulse shape and changes in  $\psi$ . a, One ball,  $\Delta\psi_{\text{sum}}=3.08$ ; b, Maximum point of two balls,  $\Delta\psi_{\text{sum}}=3.19$ ; c, Minimum point of two balls,  $\Delta\psi_{\text{sum}}=1.35$ .

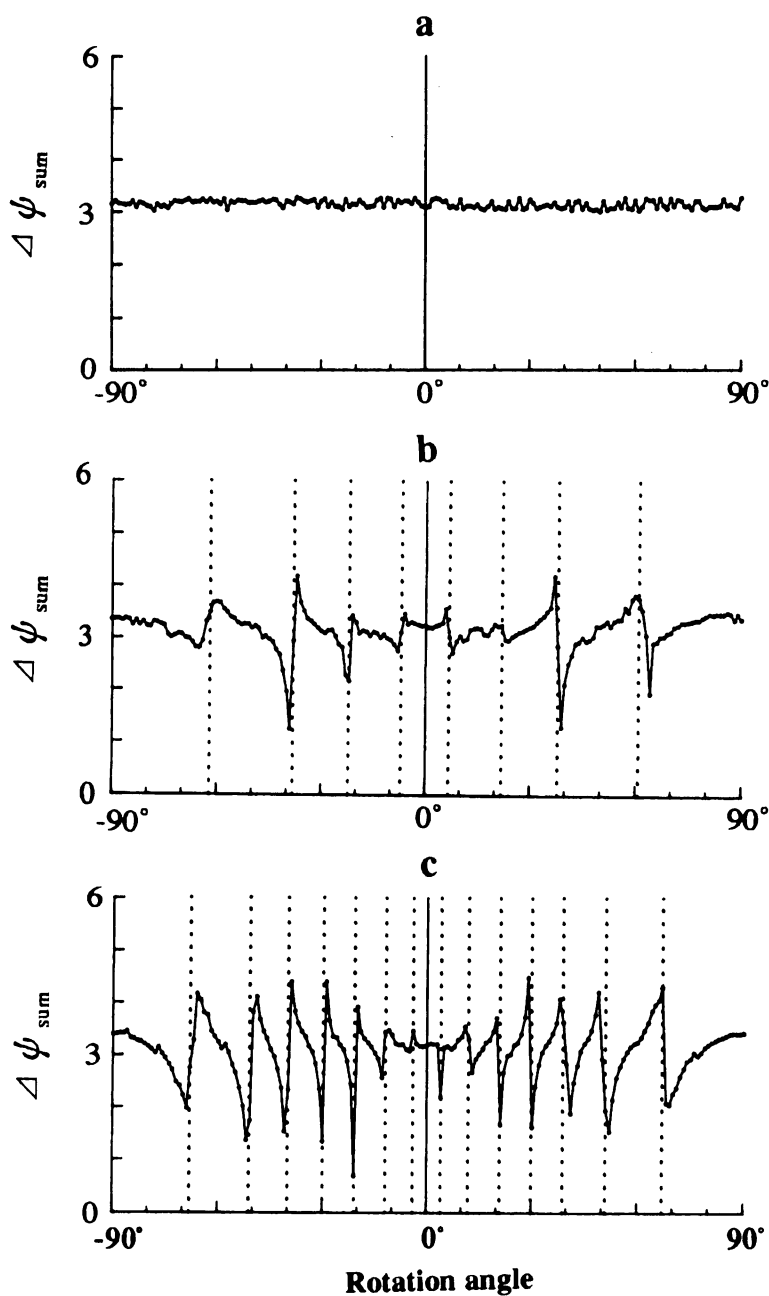


Fig. 4-6. Integrated value of changes in  $\psi$  ( $\Delta \psi_{sum}$ ). a, one ball; b, two balls separated by a distance of 50mm; c, two balls separated by a distance of 100mm.

## 第5章 魚体の反射指向性パターンおよび反射波形の解析

4.1節では時間領域の演算によって自己相関係数を求め、2球体間隔が推定できることを示した。また4.2節では搬送波周期の変動が干渉による反射指向性パターンの変動と密接に関連することを示した。そこで4次実験として魚体の構造推定への応用を目的とする実験を行った。内容は懸垂法による魚体の背方向反射の測定である。

本章ではスペクトル解析の手法を導入して振動数領域から反射指向性パターンを解析し、魚体内に想定される仮想的な音源の間隔を計算した<sup>62)</sup>。またトレンドの影響を受けにくい搬送波周期の測定法として、3次曲線補間を用いて搬送波の極大点、極小点を推定し、その間隔から搬送波周期の変動を求めた。

### 5.1 測定方法および使用魚体

音軸に対する魚体の姿勢角は頭部方向からの入射を $-90^\circ$ 、背方向からを $0^\circ$ 、尾部からを $90^\circ$ とし、旋回制御装置によってPitch plane内を $1^\circ$ 刻みで $180^\circ$ 旋回させた。

測定に使用した魚体は鹿児島県野間池の定置網に入網した8魚種23尾の活魚で、いずれも有鰾魚である。以下に魚種名、尾数を示す。

マダイ	<i>Pagrus major</i>	6尾
ブリ(幼魚)	<i>Seriola quinqueradiata</i>	5尾
ギンガメアジ	<i>Caranx sexfasciatus</i>	3尾
カゴカキダイ	<i>Microcanthus strigatus</i>	3尾
コノシロ	<i>Konosirus punctatus</i>	3尾
イスズミ	<i>Kyphosus cinerascens</i>	2尾
クロサギ	<i>Gerres oyena</i>	1尾
ホウボウ	<i>Chelidonichthys spinosus</i>	1尾

Fig. 5-1は縮小表示した魚体像を体長・体高座標上に表示したものであり、右下が紡錘形、左上が側偏形の魚体型であることを示す。Fig. 5-2は鰾および骨格の状態を観察するために撮影した軟X線写真である。

マダイ、ブリ、ギンガメアジの3魚種については、完全な状態、内臓および鰾を海水中で摘除した状態、肉質を取り去って骨格のみにした状態の3種で測定を行った。測定尾数はそれぞれ3、3、2尾である。

8魚種の反射指向性パターンの代表例をFig. 5-3に示す。この図は平均反射波形のpp値を $1^\circ$ ごとに極座標上にプロットしたものである。全体的に背方向が大きく頭部尾部の小さい基本的なパターンに変動幅の大きな短周期のパターンが重畳した形である。しかし変動の周期性は魚種・魚体によって個体差が大きく、単純な方法では類型化することが困難であることがわかった。

反射指向性パターンの変動周期の解析にスペクトル解析を応用した例として、Pasaribu<sup>63)</sup>の報告があげられる。Pasaribuは樹脂製魚体モデルに骨格や疑似鰾を挿入して反射指向性

パターンを測定し、反射振幅と入射角度座標上のデータのスペクトルから骨格や鰭の影響を評価した。しかし本論では魚体内部の反射音源の干渉による変動を検討するので、4.1節で用いた方法により入射角度を伝搬距離差に座標変換しサンプリングし直した後、スペクトルの解析を行った。

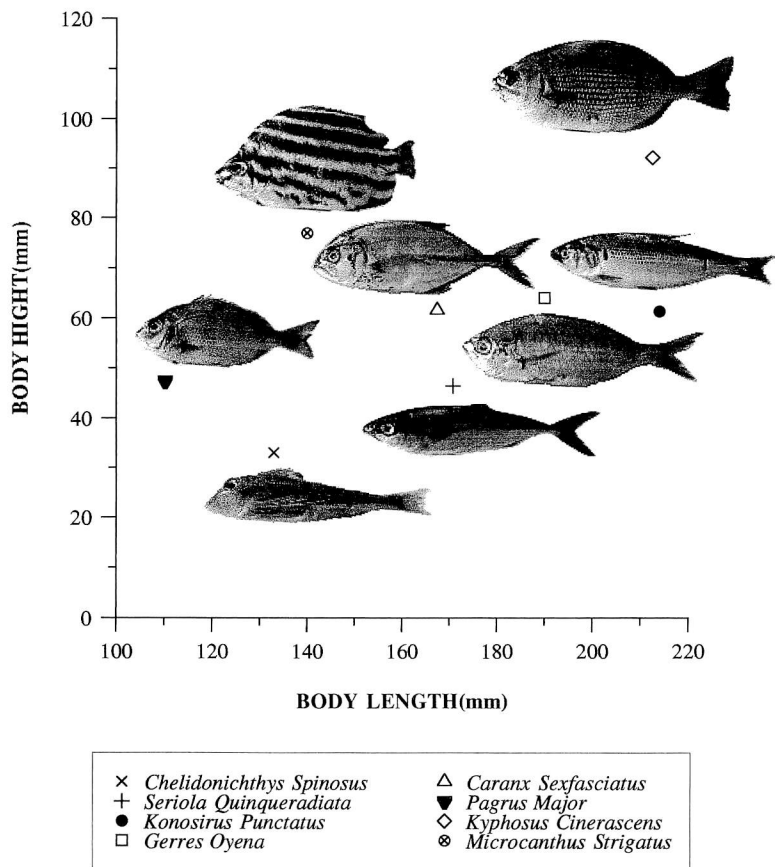


Fig. 5-1. External shape, body length and body height of fishes.

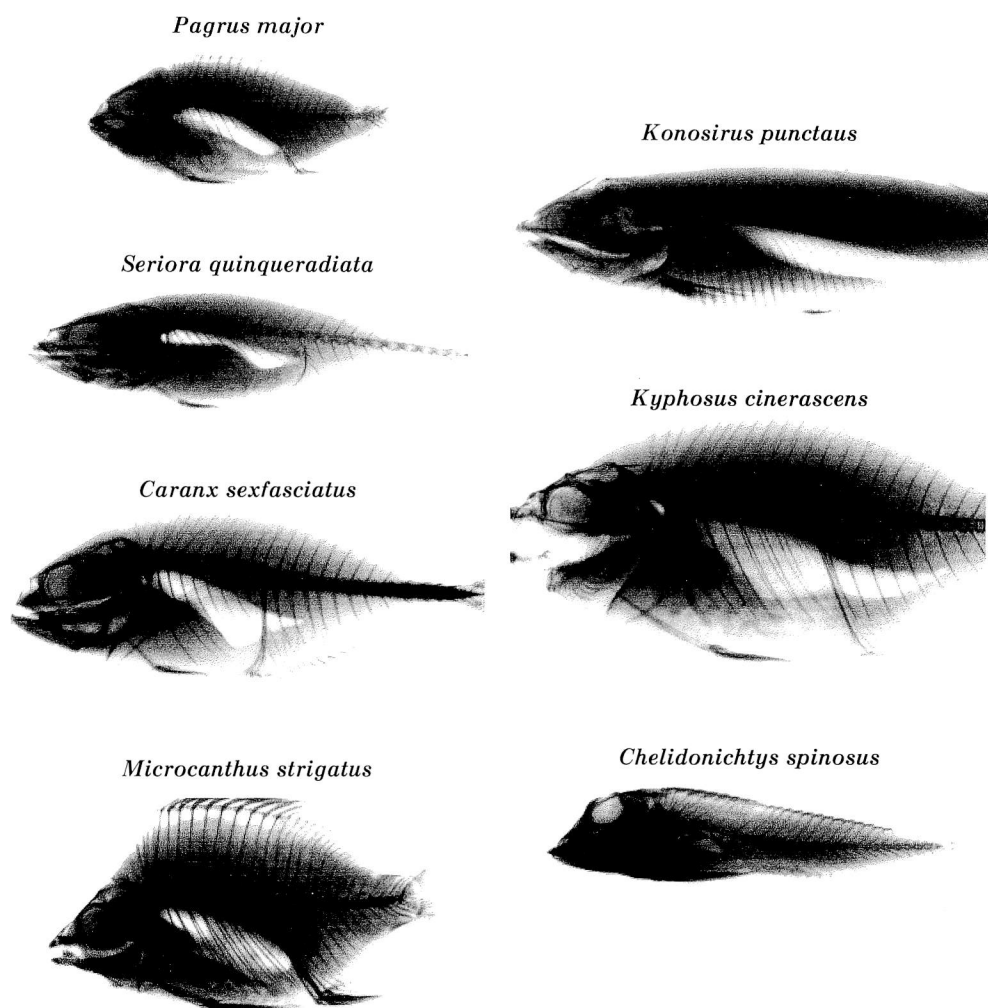


Fig. 5-2. SOFTEX photograph of the fishes.



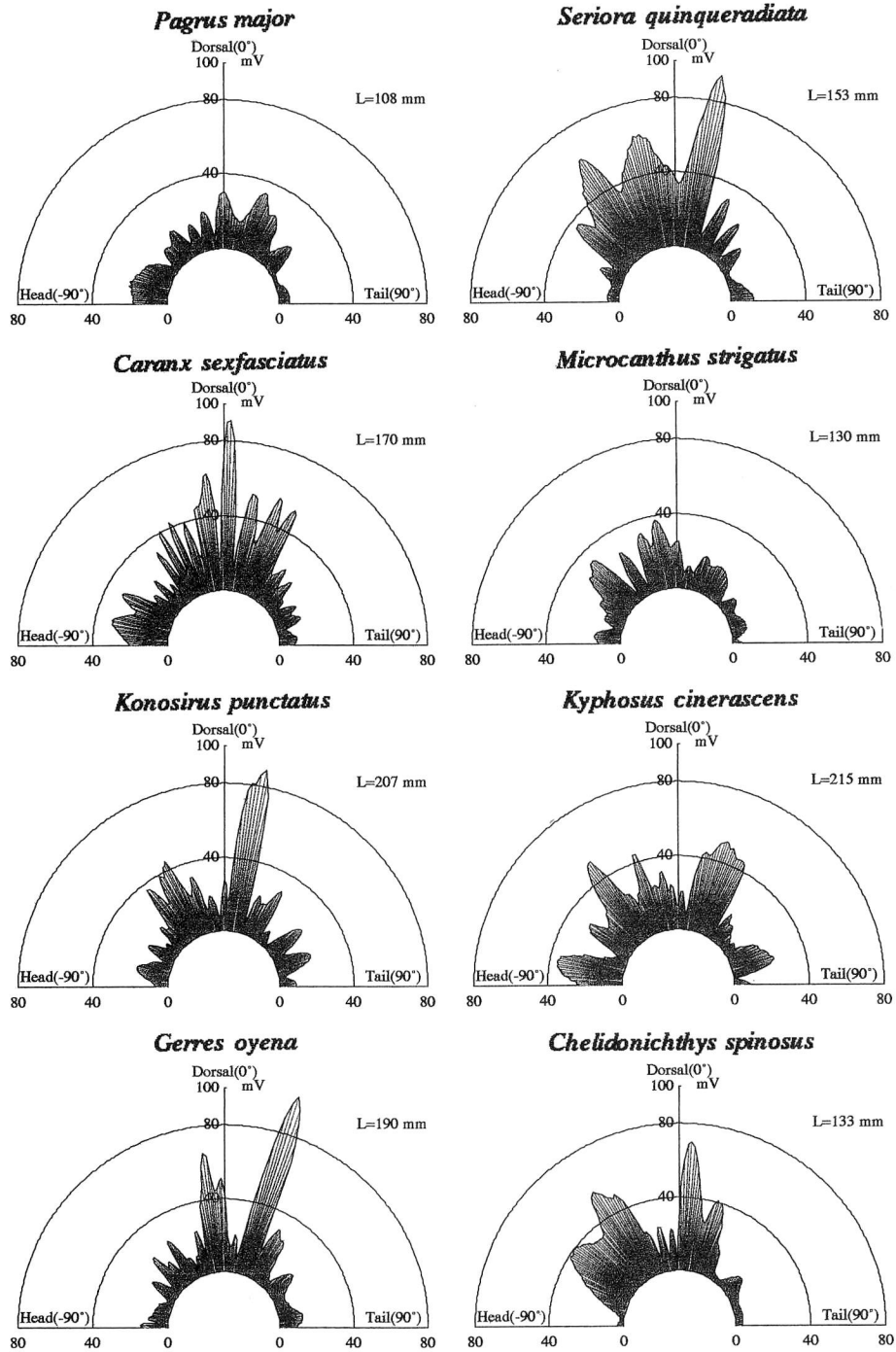


Fig. 5-3. Dependence of reflecting pattern on aspect. Used frequency is 50 kHz and pulse width is 1 msec.

## 5.2 背方向反射指向性パターンの変動要因の分析

### 5.2.1 反射指向性パターンの変動についての予備的検討

フーリエ変換によるスペクトル解析の手法を用いてより応用範囲の広い反射指向性パターンの分析を試みた。結果の検討の前に魚体反射指向性パターンの変動の要因と予測されるスペクトルの分布傾向について整理する。

#### 1) 不規則雑音

送信出力や位相のゆらぎ、バックグラウンドノイズなどの、入射角の変化と無相関の成分がこれに相当する。したがって反射指向性パターンの振動スペクトルの上では特定のピーク、すなわち周期性を持たない。また魚体の回転制御のふらつきもこの範疇に含まれる。本実験の場合同一条件で同期のとれた多数回の波形を得ることができるので、Ensamble Averaging によって S/N 比を向上させることが可能である。

#### 2) 入射角による投影面積の変化

魚体が散乱・吸収する音響エネルギーの総和は投影面積によって規定される。本実験では頭部入射から尾部入射まで180°の測定を行ったので、この成分は頭部、尾部で小さく背方向で大きい緩やかな変化となって現れるものと推定される。この場合振動数スペクトルは振動数0の定数成分を含む低振動数領域に重畳して現れる。またその変化は魚体型の違いによる投影面積の増減、入射面の曲率の差などの影響を受ける。

#### 3) 魚体の構成要素が持つ指向特性による変化

鰭のように強い反射音源と考えられる構成要素はそれ自身に由来する指向特性を有する。この指向特性は無数の点音源の干渉に帰結されるが、反射指向性パターンの変動の上では2)と同様の緩やかな変化として現れる。個々の構成要素の空間的な広がりか魚体長に比較して小さいため、波長に対する魚体長( $L/\lambda$ )が比較的小さい場合には激しく振動する変化の原因とはならないであろう。振動数スペクトルは2)と同様低い領域に現れることが予想される。

#### 4) 魚体構成要素間の干渉による変化

この変化は反射指向性パターンに極を形成する。極大値付近では各部の反射の位相差が小さく足し合わせの干渉が現れており、極小値付近では各部の反射の位相が90°以上ずれて打ち消し合いの干渉が生じている、とみなせる。

魚体の内部構造に関する情報と強い関連があるのは4)の変化である。これによる変動の周期は仮想的な反射音源間の間隔と波長の関係で決まる。以後4)の成分を中心に検討を進める。

### 5.2.2 反射指向性パターンの振動スペクトル

スペクトル解析に関する基本的事項は主に日野<sup>60)</sup>、南<sup>64)</sup>によった。伝搬距離差領域で等

間隔にサンプリングされた  $\{X_k\}$  の離散フーリエ変換を  $\{F_k\}$  とすると、この変換は次式で示される。

$$F_k = \sum_{j=0}^{n-1} X_j e^{-2\pi i j k / n} \quad (5-1)$$

またパワースペクトル  $\{P_k\}$  は

$$\{P_k\} = \{F_k F_k^*\} \quad (5-2)$$

となる。ここで  $\{F_k^*\}$  は  $\{F_k\}$  の複素共役である。 $\{P_k\}$  はナイキスト振動数で折り返すことにより、振動数  $N = 0$  から  $N = 256$  までの257本の片側離散スペクトルとして表される。ギンガメアジの場合の  $\{X_k\}$  および  $\{P_k\}$  を一例として Fig. 5-4 に示す。スペクトルは振動数40以下の成分を表示した。振動数40を超える成分は漸減し、全パワーに対する寄与は無視できることを確認した。

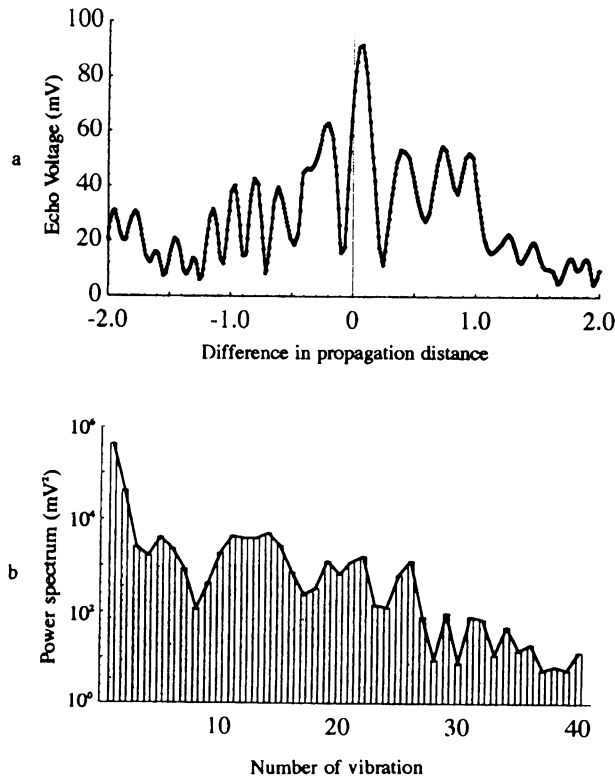


Fig. 5-4. Results of *Caranx sexfasciatus*. a, transformed reflecting pattern to distance coordinate from angular coordinate. b, one-sided power spectrum of a. Number of vibration (frequency) range of the spectrum graph is 0 to 40. The power out of range is so little as to be neglected.

反射指向性パターン全体のパワーはParsevalの公式の離散表現により

$$\sum_{m=0}^{N-1} X_m^2 = P_0 + \sum_{k=1}^{N/2-1} P_k + P_{N/2} \quad (5-3)$$

で表される。

反射指向性パターンに周期性が存在する場合はスペクトル分布上に特定の帯域幅を持ったピークを生じる。そこでスペクトルの分布から判断していくつかの帯域に分割した。帯域分割には数学的手法は用いなかったが、スペクトル分布をリニア軸上にプロットして段階的に拡大表示することにより、変化の連続性とレベルを総合的に判断した。

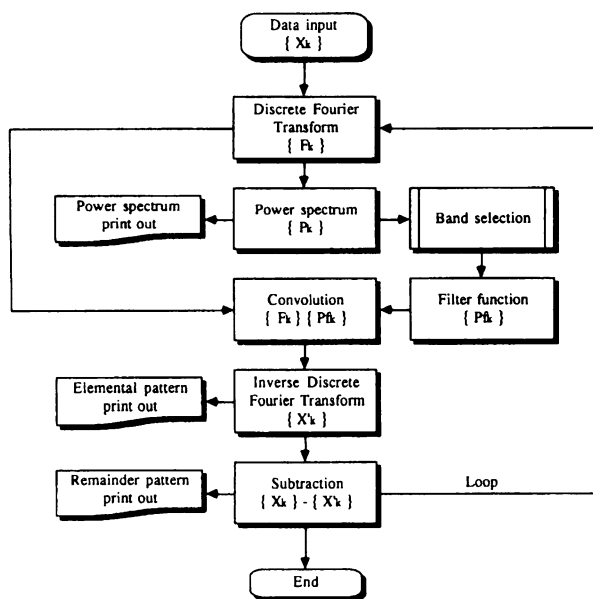


Fig. 5-5. Flow chart for elemental pattern extraction.

各帯域の成分を振動数領域に設けたフィルターにより抽出し、これをさらに逆フーリエ変換することによって成分パターンに分解した。フィルター関数  $\{P f_k\}$  には矩形ローパスフィルターを用い、 $\{F_k\}$  との積を逆フーリエ変換して計算した。処理のフローチャートを Fig. 5-5 に示す。  $N=0$  の成分は逆フーリエ変換するとデータ領域で定数（データの平均値）になる。このときの残差が反射指向性パターンの変動成分の総和で

$$\sum_{k=0}^{N-1} P_k = \sum_{m=0}^{N-1} (X_m - \bar{X})^2 \quad (5-4)$$

となり、データの分散の  $N$  倍に等しい。

また  $k=0$  を除くスペクトルは、低振動数成分が大きく、その後いくつかのピークが現れる。ギンガメアジの反射指向性パターンを各成分に分解した結果を一例として Fig. 5-6 に示す。

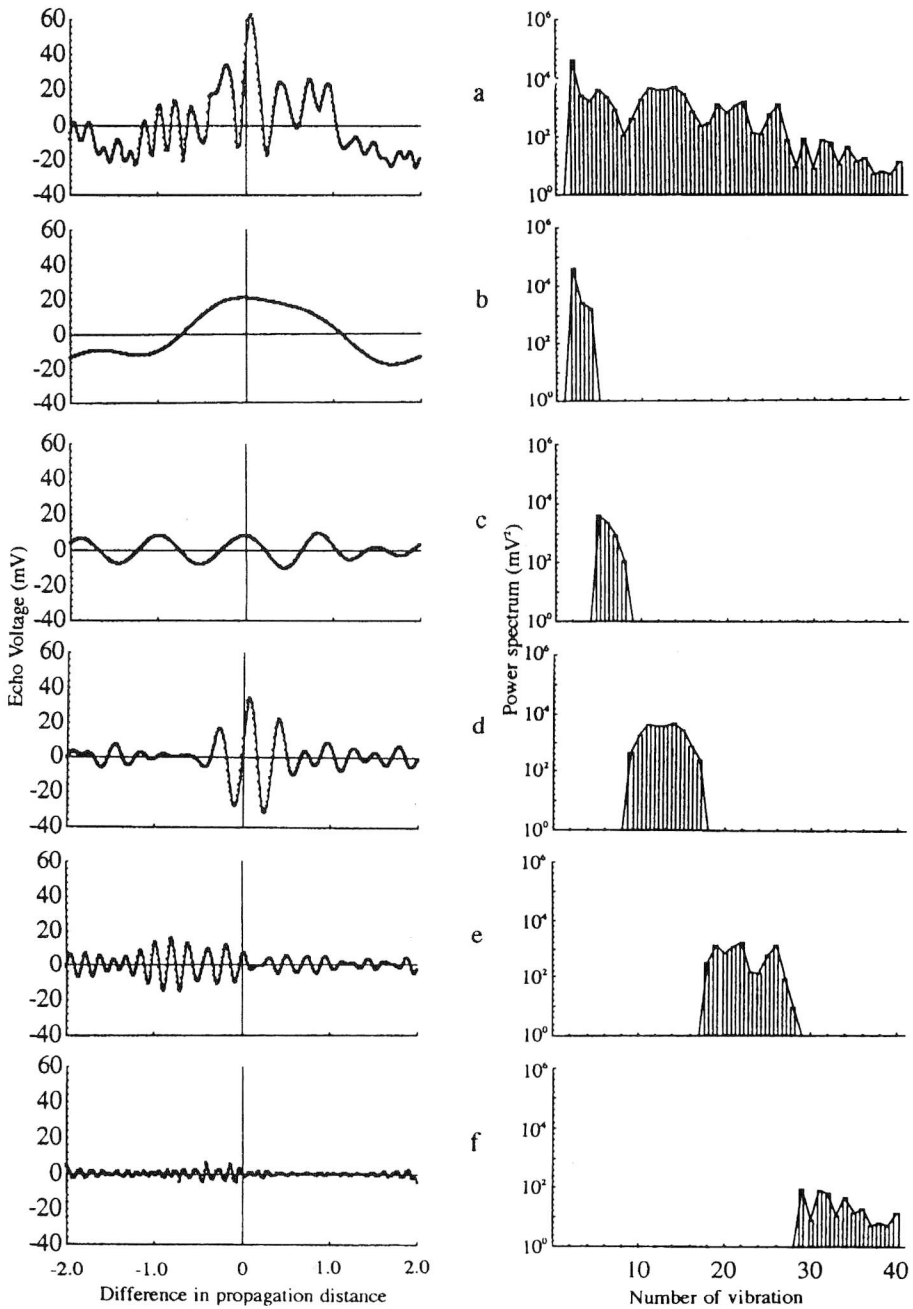


Fig. 5-6. The samples of elemental pattern extracted from *Caranx sexfasciatus* reflecting pattern and its power spectrum. a, Remainder pattern subtracted constant element from whole pattern; b, 1st. band elemental pattern; c, 2nd. band elemental pattern; d, 3rd band elemental pattern; e, 4th. band elemental pattern; f, Remainder pattern.

a は変動成分の総和のパターンおよびスペクトルである。b, c, d, e は各帯域ごとの成分, f は a から b ~ d を引き去った残差成分である。d は低振動数成分で、頭部・尾部で小さく背方向で大きくなる。このことから干渉による変動とみなすより前項 2) で述べた投影面積の変化,あるいは魚体が受け取る音響エネルギーの総量の変化による変動と、前項 3) で述べた鰾が単独で作り出すブロードな指向性の複合した成分であると推察される。c は明瞭なピークとは言えず、魚体によっては b の成分と融合する場合もあった。d は周期振動成分のうち寄与が最も大きく、この魚体の反射指向性パターンを特徴づけている成分である。全パワーに対する寄与率は7.7%と小さいものの、反射指向性パターンに大きな変動を与えていることが推察される。

ギンガメアジ、ブリ、マダイの3魚種について、魚体全体、鰾と内臓の摘除、および骨格の3状態について成分と寄与率を計算した結果を Table 5-1 に示す。なお、振動数の帯域は便宜的に7帯域に分けた。これらは音源間隔に換算すると0 mm, 0~30mm, 30~60mm, 60~90mm, 90~120mm, 120~150mm, 150mm<に相当する。

3魚種とも鰾の摘除によって低振動成分の寄与率が低下している。これは鰾の存在が反射指向性パターンの安定化に寄与していることを裏付ける結果といえる。しかしギンガメアジ、ブリの全パワーが鰾の摘除によってそれぞれ32.4%, 30.9%に低下したのに比較して、マダイは57.4%にとどまった。また骨格の反射は魚体全体に対してギンガメアジ7.0%, ブリ5.6%に対してマダイが15.3%であった。これは魚体の総合的な反射に対する鰾や骨格の寄与は魚種・魚体型による差があることを示唆している。

Table 5-1. Elemental power ( $\text{mV}^2$ ) of *Caranx sexfasciatus* reflecting pattern. Wave number range divided 7 bands.

Species	Condition	Elemental power of bands divided by distance between fictitious sound reflector ( $\text{mV}^2$ )						
		0mm	7.5-30mm	60mm	90mm	120mm	150mm	150mm~
<i>Caranx sexfasciatus</i>	Whole	590041.1 (72.8%)	123391.6 (15.2%)	31806.6 (3.9%)	44623.7 (5.5%)	6082.8 (0.8%)	6800.3 (0.8%)	7371.7 (0.9%)
	Bladderless	211045.1 (80.5%)	19908.1 (7.6%)	15282.1 (5.8%)	6755.6 (2.6%)	3765.6 (1.4%)	3974.7 (1.5%)	1587.9 (0.6%)
	Skeleton	35921.4 (63.4%)	10069.5 (17.8%)	7964.6 (14.1%)	2063.4 (3.6%)	394.1 (0.7%)	152.5 (0.3%)	54.3 (0.1%)
<i>Seriola quinqueradiata</i>	Whole	919664.9 (72.0%)	268388.0 (21.0%)	57539.0 (4.5%)	24419.8 (1.9%)	4976.0 (0.4%)	821.7 (0.1%)	859.5 (0.1%)
	Bladderless	325228.9 (82.4%)	43736.0 (11.1%)	15664.3 (4.0%)	6783.0 (1.7%)	2326.7 (0.6%)	615.6 (0.2%)	286.6 (0.1%)
	Skeleton	51568.7 (70.2%)	16225.9 (22.1%)	269.1 (0.4%)	2108.3 (2.9%)	3005.3 (4.1%)	169.8 (0.2%)	94.2 (0.1%)
<i>Pagrus major</i>	Whole	117137.3 (77.9%)	26241.2 (17.4%)	5560.6 (3.7%)	1164.8 (0.8%)	116.7 (0.1%)	52.4 (0.0%)	137.9 (0.1%)
	Bladderless	77293.4 (89.5%)	3568.4 (4.1%)	2975.9 (3.4%)	2235.0 (2.6%)	154.0 (0.2%)	63.4 (0.1%)	95.6 (0.1%)
	Skeleton	19306.8 (83.7%)	1442.6 (6.3%)	1975.4 (8.6%)	247.8 (1.1%)	55.1 (0.2%)	12.3 (0.1%)	19.0 (0.1%)

### 5.2.3 ターゲットの仮想音源間隔の計算

Wiener-Khintchine の関係から、最大値で規準化した変動成分のパワースペクトルのフーリエ変換により、自己共分散係数 (variance function coefficient) が得られる。自己共分散

散係数は原データ系列の変動成分だけを取り出して求めた自己相関係数である。そのため反射指向性パターンのように定数成分の大きな関数から変動周期を求める場合には、原データ系列の自己相関関数よりも周期性が強調されるため有利である。

Table 5-1 に示した 3 魚種 8 魚体の自己共分散係数曲線を Fig. 5-7 に示す。線種の違いは異なる魚体であることを表している。図の横軸 (lag) は音源間隔  $d$  との比で表した伝搬距離差であり、曲線上の点は反射指向性パターンの基本周期を示す点である。横軸の変域は  $4d$  であるが、自己共分散が意味を持つのは変域の  $1/2$  までの lag であるから図は  $0$  から  $2d$  の範囲を表示した。この図から lag を読みとり、(4-7) 式によって音源間隔  $d$  を求めた結果を、魚体長などとともに Table 5-2 に示した。このとき海水中の音速  $1,499.0\text{m/sec}$ 、搬

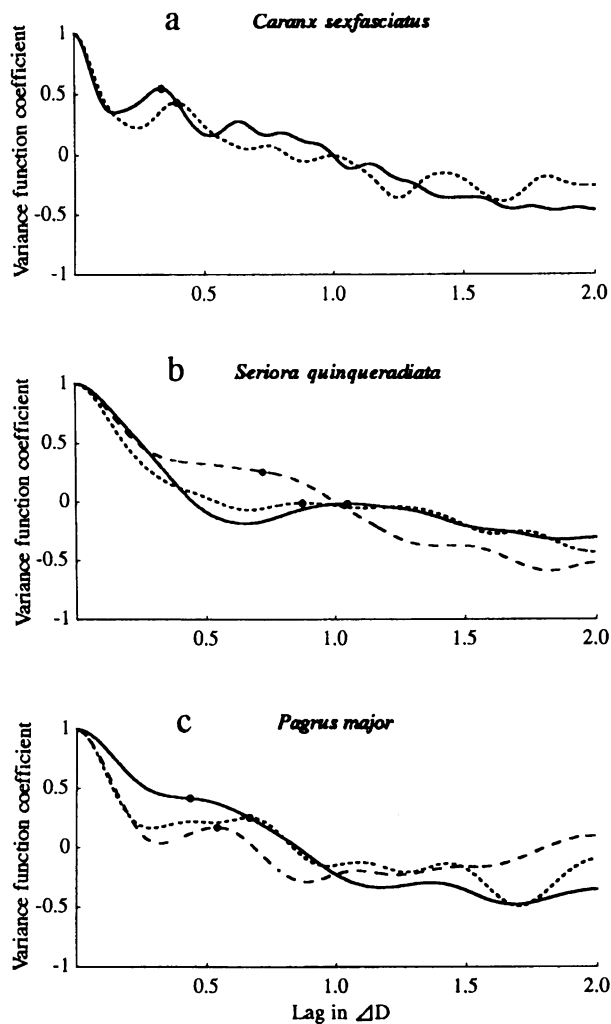


Fig. 5-7. The variance function coefficient of samples. a, Two samples of *Caranx sexfasciatus*; b, Three samples of *Seriola quinqueradiata*; c, Three samples of *Pagrus Major*.

Table 5-2. The estimated distance between fictitious sound reflector and samples size.

Species	Distance (mm)	Variance function coefficient	Body length (mm)	Body height (mm)	Body width (mm)	Bladder length (mm)	Bladder height (mm)
<i>Caranx sexfasciatus</i>	87.4	0.55	170.0	61.0	23.0	69.0	16.0
	75.9	0.43	165.0	64.0	23.0	58.0	16.0
<i>Seriola quinqueradiata</i>	28.6	-0.02	165.0	45.0	29.0	47.0	12.0
	34.3	-0.01	174.0	48.0	29.0	49.0	9.0
	40.1	0.03	153.0	44.0	26.0	42.0	8.0
<i>Pagrus major</i>	64.9	0.42	108.0	44.0	19.0	37.0	8.0
	45.1	0.25	103.0	45.0	19.0	36.0	10.0
	55.6	0.16	105.0	44.0	19.0	36.0	10.0

送波周波数50kHzから波長 $\lambda$ は29.98mmとなる。

反射指向性パターンの周期振動を2成分の干渉で説明した場合、その仮想音源間隔はギンガメアジ、マダイで体長の50%前後、ブリで20%前後に相当することがわかった。

自己共分散係数曲線には魚種による特徴が認められる。特にギンガメアジとブリはほぼ同体長であるにもかかわらず、明らかに異なる傾向を示している。ギンガメアジは最も変動の周期性が強く、lagが増加しても規則的にピークが現れる傾向がある。ブリの場合自己共分散係数はlagの増加にともなって滑らかに減少し、反射指向性パターンの周期振動が少ないことを示している。マダイは、体長が他の2魚種より約60mm小さいが、ブリに比較して周期性が強く現れている。

以上の結果から、ブリは体長に比較して反射音源の体軸方向の広がりがある他の2魚種より小さいと推定される。これはギンガメアジとマダイが側偏形の魚体であるのに比較して、ブリは紡錘形の魚体であり、鰾の影響がより強く現れた結果と推察した。またギンガメアジとマダイに認められた周期性のある変動は、骨格など鰾以外の反射成分が無視できない大きさであり、鰾の反射との干渉によって現れたものと解釈できる。

#### 5.2.4 背方向 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 15^\circ$ のパワースペクトル

フィールドにおいては頭部方向、尾部方向を含む $180^\circ$ の反射指向性パターンを得ることは不可能である。そこで実用的な見地から実際の垂直魚群探知機で得られる可能性のある背方向 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 15^\circ$ の範囲でパワースペクトルを計算した。範囲外のデータを振幅0とし、データ点数とサンプリング間隔は $\pm 90^\circ$ のパターンと同じ条件で計算した。ウィンドウ処理は行っていないがデータの不連続によるエイリアス（Gibbs現象）は振動数の高い部分に現れるので今回の解析には影響が小さい。Fig. 5-8に示すように、有効データ点数の減少からスペクトルの分解能は低下するものの全体の傾向は $\pm 180^\circ$ の範囲の特徴を保存している。特に最も特徴的な変動を示す振動数8から13の成分は $\pm 15^\circ$ に制限した場合にも良く再現されている。したがってフィールドにおいても反射振幅の変動を解析することによって反射体の特徴を読みとれる可能性がある。ただしスプリットビーム法などを用いて入射角を推定すること、MEM（最大エントロピー法）等変動区間に依存しない高分解能スペクトル推定法を利用することなど検討すべき問題点が多い。

スペクトル解析の手法を用いて魚体の反射指向性パターンについて検討した結果、いくつかの知見が得られた。特に反射指向性パターンから特定の振動数帯域の要素を分離できたこ



と、体型によって反射指向性パターンの変動周期に異なる傾向が表れたことは魚種判別につながる手がかりとなり得る。

フィールドでの応用については可能性を指摘できたにとどまったが、統計処理に依存しない直接的な反射体に関する情報収集の手段として検討の価値があるだろう。

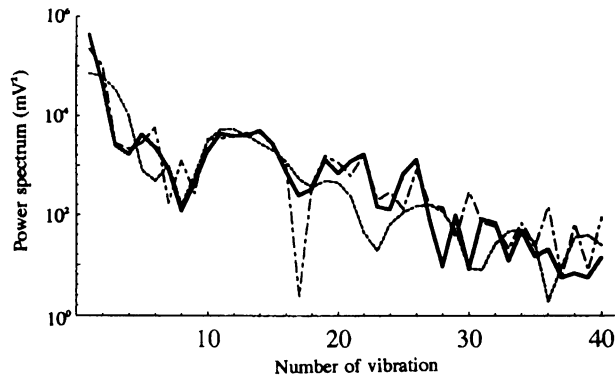


Fig. 5-8. The power spectrums of *Caranx sexfasciatus* reflecting pattern. Solid lines are not restricted on incident angel ( $\pm 90^\circ$ ). Broken lines are restricted in incident angle ( $\pm 30^\circ$ ). Fine dashed lines are restricted in incident angle ( $\pm 15^\circ$ ).

### 5.3 魚体の反射波形の変動

#### 5.3.1 極大・極小点時間差の推定

前章では波形の変動を搬送波周期の微小な変化から捉え、2球体の場合には干渉の状態を判定する指標となることを示唆できた。しかし離散データの1次補間によるゼロクロス点のトレースという単純な方法によったため、適用できる振幅の範囲が狭く、パルスの立ち上がり・立ち下がりという変動を捉える上で重要な範囲の解析が不十分であった。そこで4次実験ではサンプリング周波数409.6kHzのシステムによって波形データ自体の情報量を増やし、周期の測定も3次補間による極大点、極小点の推定値を求めることによってトレンドの影響を受けない計測法を試みた。

Fig. 5-4に反射指向性パターンを示したギンガメアジの反射波形とゼロクロス点トレース法による位相変化グラフの一部( $-60^\circ \sim 59^\circ$ )をFig. 5-9の(1), (2)に示す。各波形図の左側に反射信号電圧(mVpp)、上側に波形番号と入射角度を示した。全体の傾向として極小点近傍で波形が変化し位相変化にも乱れが生じていると判断できる。しかしゼロクロス点トレース法は波形データに重畳する低周波トレンドの影響により小振幅部分の周期の測定が不正確で、極端な場合には振幅がベースラインからはずれトレースが欠落する場合もあった。そこで本実験ではサンプリング周波数を上げたうえで3次曲線による部分補間関数を求め、その曲線上で極大・極小点座標を計算し、真の極値が存在する時間を推定した。この極値トレース法の場合、波形にトレンドが存在しても1周期ごとの周期測定が可能である。補間関数にはニュートン法による3次多項式適合法を用いた。測得離散データ時系列を $\{A_k\}$ とすると、離散データの極大値 $A_i$ は $A_{i-1} < A_i$  AND  $A_i > A_{i+1}$ なる条件で検索される。検

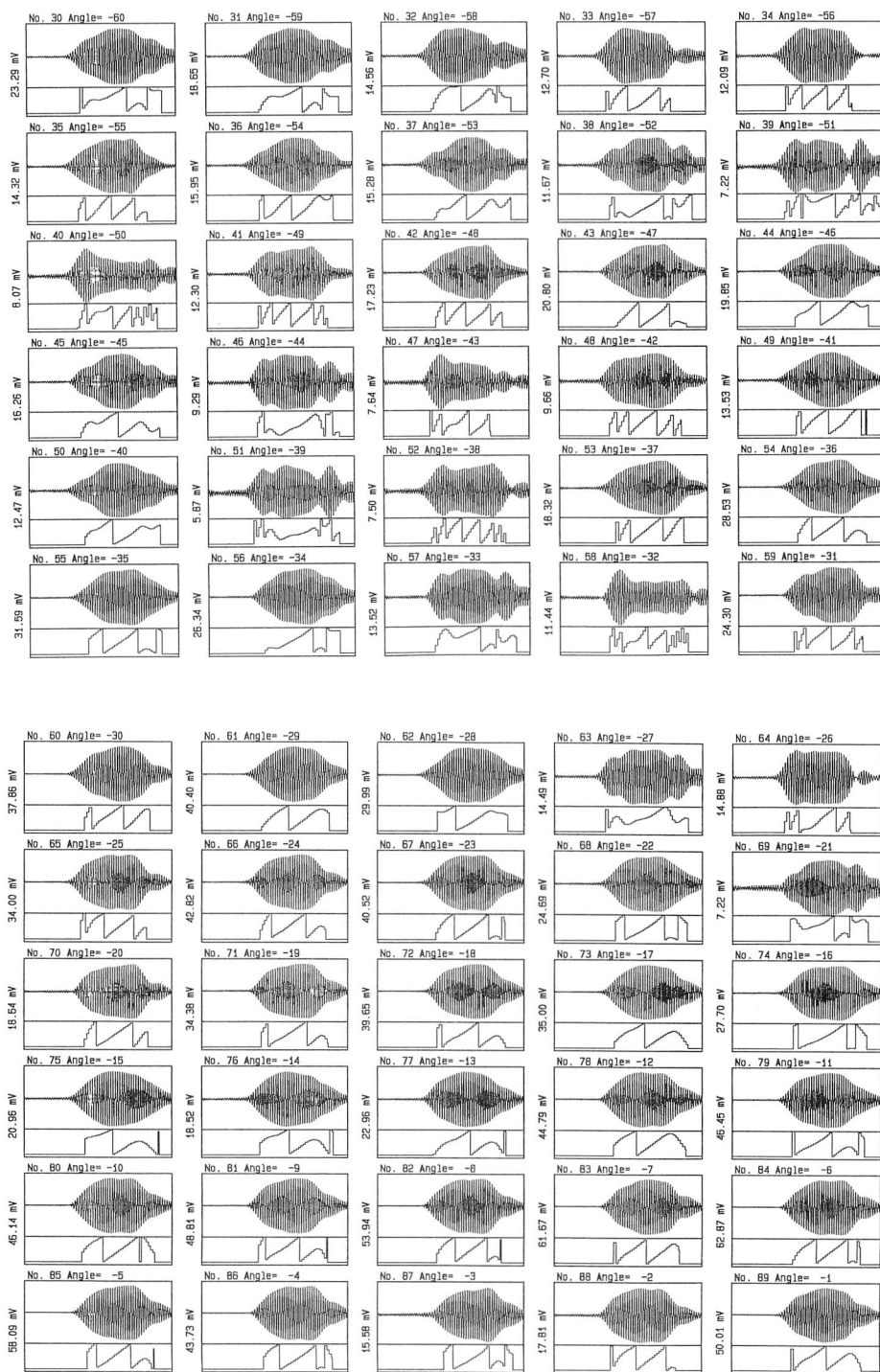


Fig. 5-9(1). Variation of pulse shape and phase in *Caranx sexfasciatus*. Incident angle are  $-60^{\circ} \sim -1^{\circ}$ .

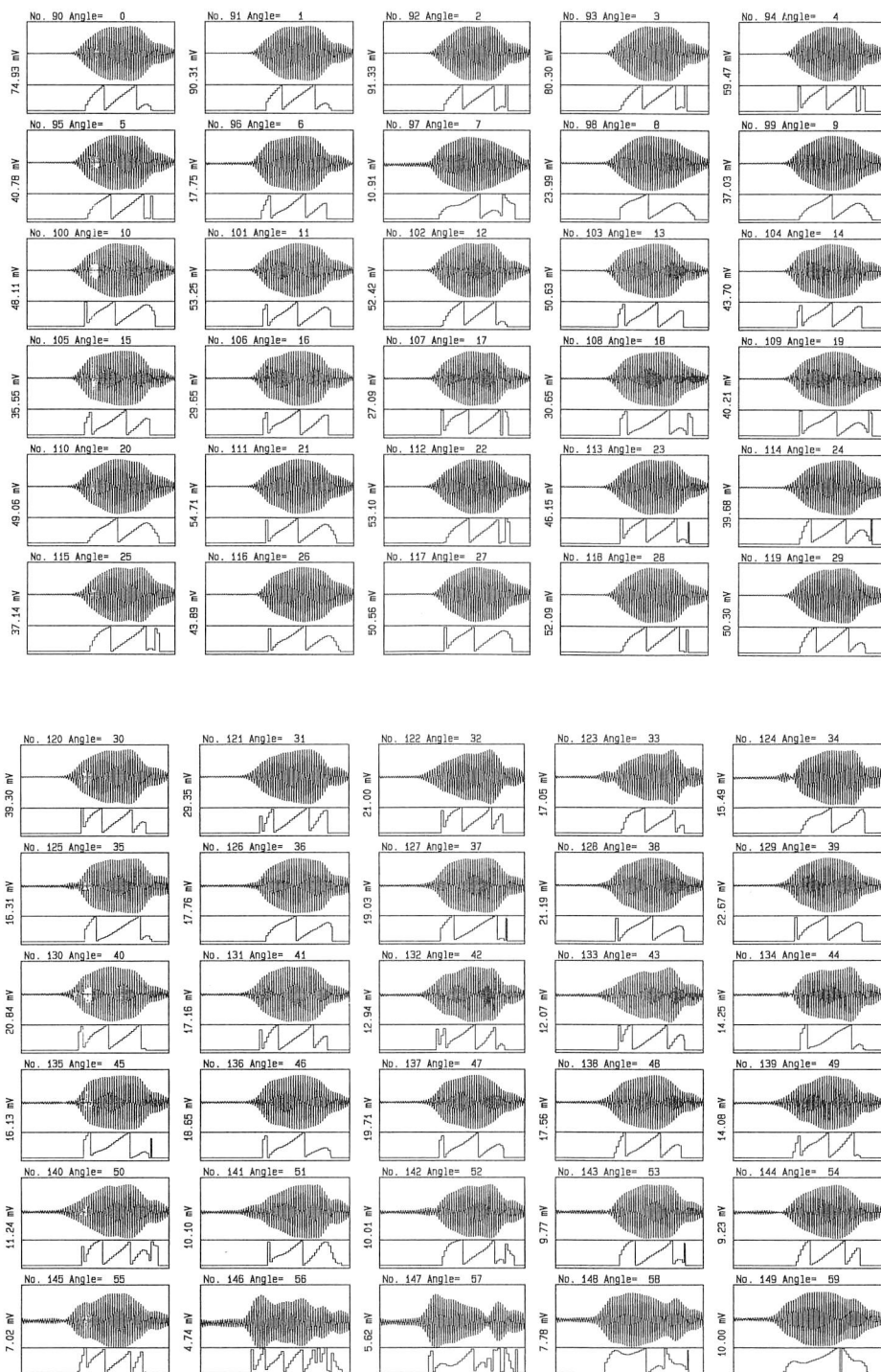


Fig. 5-9(2). Variation of pulse shape and phase in *Caranx sexfasciatus*. Incident angle are  $0^{\circ} \sim 59^{\circ}$ .

索された個数を $m$ 個とする。 $A_{i-2}$ から $A_{i+1}$ までの4点のデータを取り出し、部分補間関数 $f_1(t)$ を求める。次に $X_{i-1}$ から $X_{i+2}$ について同様に補間関数 $f_s(t)$ を求め、両曲線の平均曲線として $X_{i-1}$ から $X_{i+1}$ の区間で補間曲線を求める。区間内の微分値が0となる点が推定極大点座標である。 $\{X_k\}$ の符号を反転して同様の操作をすると推定極小点座標の振幅の符号を反転した結果が得られる。このようにして次々に極値を求めると極値座標系列 $\{W_m\}$ は

$$\{W_m\} = \{(t, A)_m\} \quad (5-5)$$

となる。ここで $\{t_m\}$ はサンプル点座標上の数値であり、各数値の小数部分は極値が現れるサンプリング周期上の位相 $\phi$ を表している。 $\{t_m\}$ はサンプリング間隔 $\Delta s$ を乗ずることによって時間軸座標に変換される。 $\{W_m\}$ を結んだ線は原波形からサンプリングによって生じるリップルを除去した包絡線関数の近似曲線である。 $\{W_m\}$ から時間データ系列 $\{t_m\}$ を取り出し、隣合うデータの差分をとると極大極小点間の時間差系列 $\{\Delta t_{m-1}\}$ が得られる。処理の一例としてギンガメアジの極大値（入射角 $2^\circ$ 、 $-6^\circ$ ）の波形をFig. 5-10に示す。**a**は原波形、**b**は包絡線関数 $\{W_m\}$ 、**c**は時間差の時系列 $\{(t, \Delta t)_{m-1}\}$ 、**d**はサンプリ

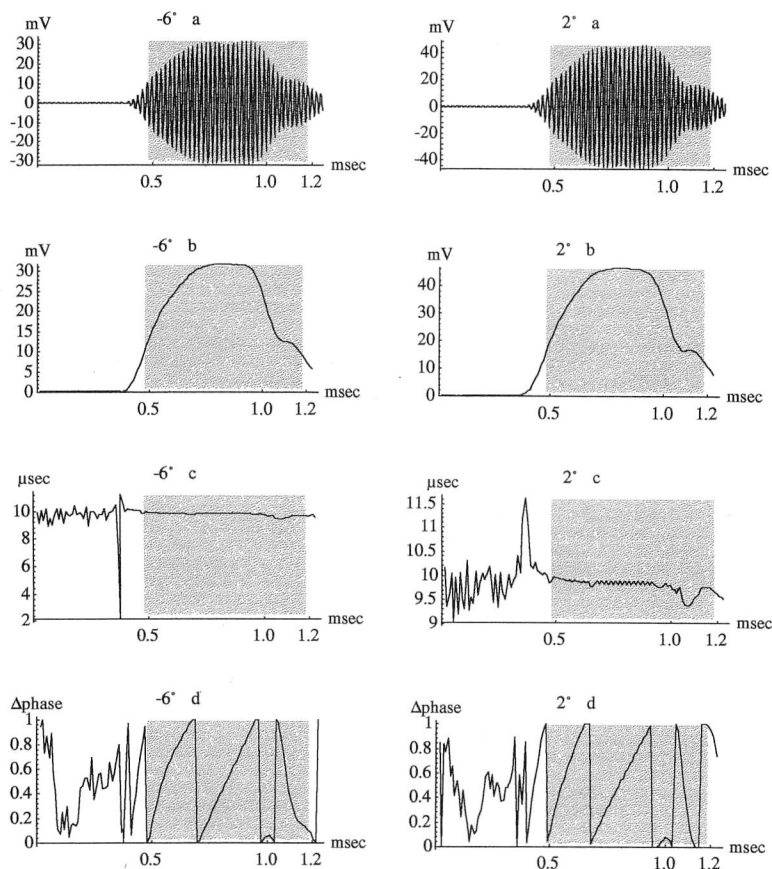


Fig. 5-10. Details of pulse shape analysis using extrema trace method at maximum points in *Caranx sexfasciatus*.

ング周期上の位相  $\{\psi_m\}$  である。ノイズ部分の周期は不規則に大きく変動し、波形部分ではほぼ一定であるが立ち上がり・立ち下がりで滑らかに変化している。d に示した位相の進行量の総和が前章で求めた  $\Delta\psi_{\text{sum}}$  に相当する。ゼロクロス点トレース法では小振幅部分での計測が不安定なため最大振幅の50%を解析区間開始点のスレッシュホールドとしたが、極値トレース法の場合にはスレッシュホールドをさらに下げることができる。今回は何度かの試行の結果、余裕をみて最大振幅の30%をスレッシュホールドレベルとした。Fig. 5-10 のハッチングされた部分が解析区間である。この区間長は約0.7msecであるが、波形ごとにわずかに異なるため単位時間（1 msec）あたりの位相進行量に換算して比較した。反射指向性パターンの最大値は魚体を構成する主要な反射音源の成分が同位相に近い状態で合成されていると考えられるので、このときの  $\Delta\psi_{\text{sum}}$  の値を規準値として比較を行えば、干渉の状態を知るための指標となる。 $\Delta\psi_{\text{sum}}$  が最大値の値から離れている場合はその波形には干渉の影響が現れていることを示し、振幅の値が個々の反射要素の最大振幅の和と比較して過小評価されていることがわかる。

Fig. 5-11の 1), 2) は極小値 ( $-27^\circ$ ,  $-21^\circ$ ) とその隣接する入射角 ( $-26^\circ$ ,  $-20^\circ$ ) の波形の解析結果である。図のように波形は基本波形と異なったものとなり極小値では2球体

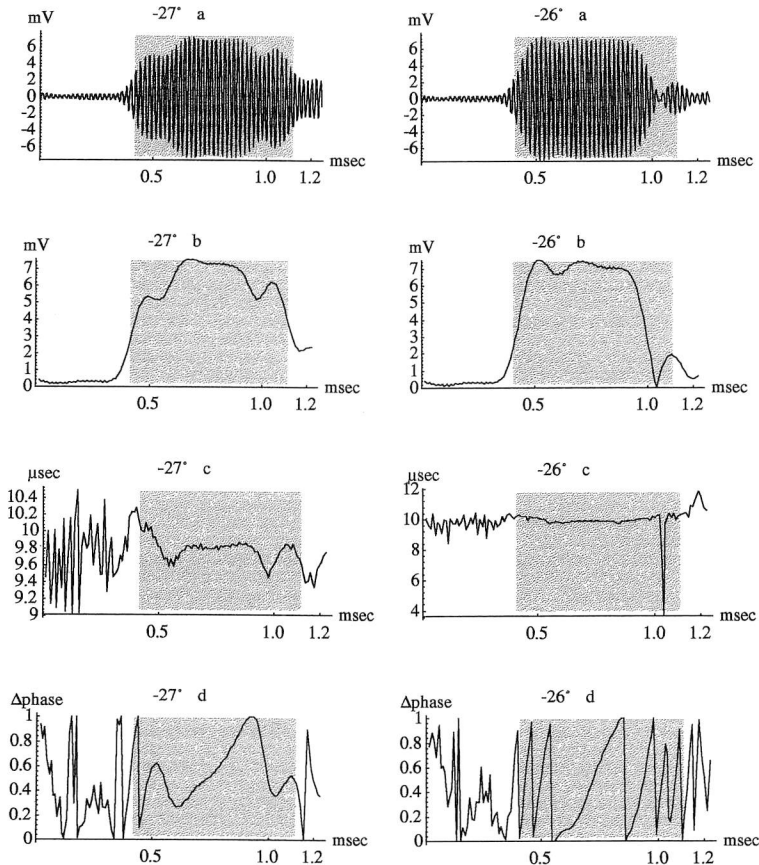


Fig. 5-11(1). Details of pulse shape analysis at minimum points and adjacent angle ( $-27^\circ$ ,  $-26^\circ$ ) in *Caranx sexfasciatus*.

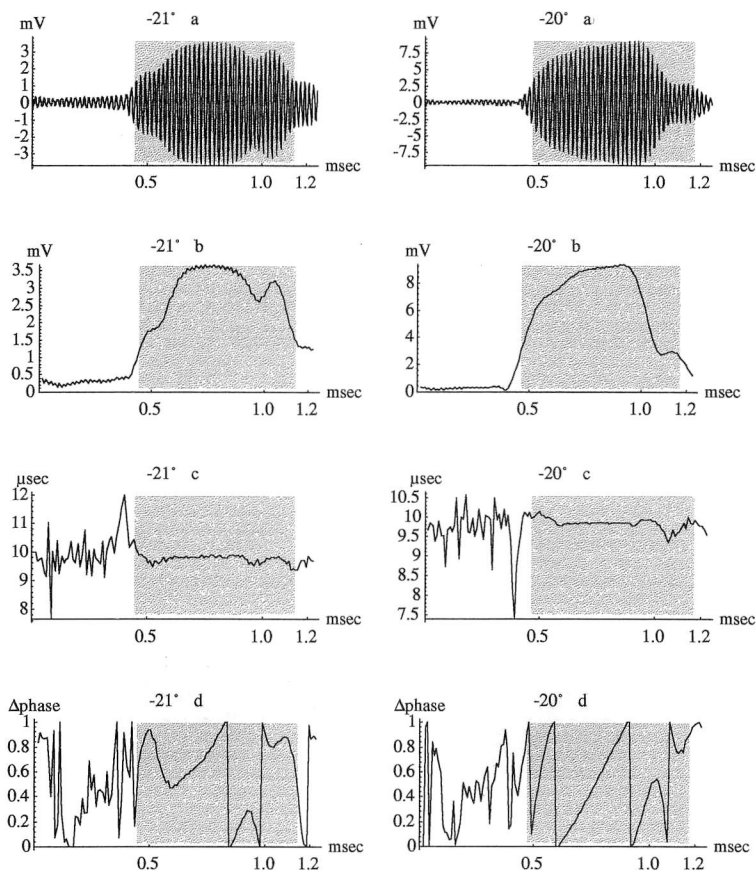


Fig. 5-11(2). Details of pulse shape analysis at minimum points and adjacent angle ( $-21^\circ$ ,  $-20^\circ$ ) in *Caranx sexfasciatus*.

の反射波形に見られた垂鈴型の波形となっている。隣接する波形ではわずか  $1^\circ$  の入射角の変化で大きく変化し、基本波形に近いものとなるが、位相の不規則性は認められ、 $\Delta\psi_{\text{sum}}$  の値も最大値から隔たっている。

### 5.3.2 異なる魚種、処理状態での比較

Fig. 5-12 の 1) から 3) は魚種、処理状態の異なる魚体の反射指向性パターン **a** と、 $\Delta\psi_{\text{sum}}$  の計算結果を角度座標上にプロットした図 **b** である。横軸の入射角度は変動の周期性を見るため伝搬距離差について線形となるよう (3-8) 式を用いて変換してある。**a** 図に示した反射指向性パターンのハッチング部分は最大値を規準としたときの干渉など影響による振幅の低下量を示している。最大反射が反射体の大きさの情報を最もよく保存しているとすれば、**a** 図のハッチング部分は干渉などの影響で過小に評価される部分と解釈できる。**b** 図のハッチング部分は最大値が現れたときの  $\Delta\psi_{\text{sum}}$  の値を規準として、そこからの隔たりの大きさを示している。規準値は 0.2 から 2.2 までの比較的狭い範囲にあり、最大値付近では波形が安定していることを示している。両図における縦の点線は反射指向性パターンに極大点が見れる入射角度である。

全体的に干渉によるパターンの落ち込みの部分で  $\Delta \psi_{\text{sum}}$  が変化しており、振幅測定値における干渉の影響を判定する指標となることが示されている。また極大値の中でも最大反射に近く情報量が大きいと考えられる波形では規準値に近い値となっている。

反射波形の変動については反射指向性パターンの干渉による落ち込みと位相進行量の変化

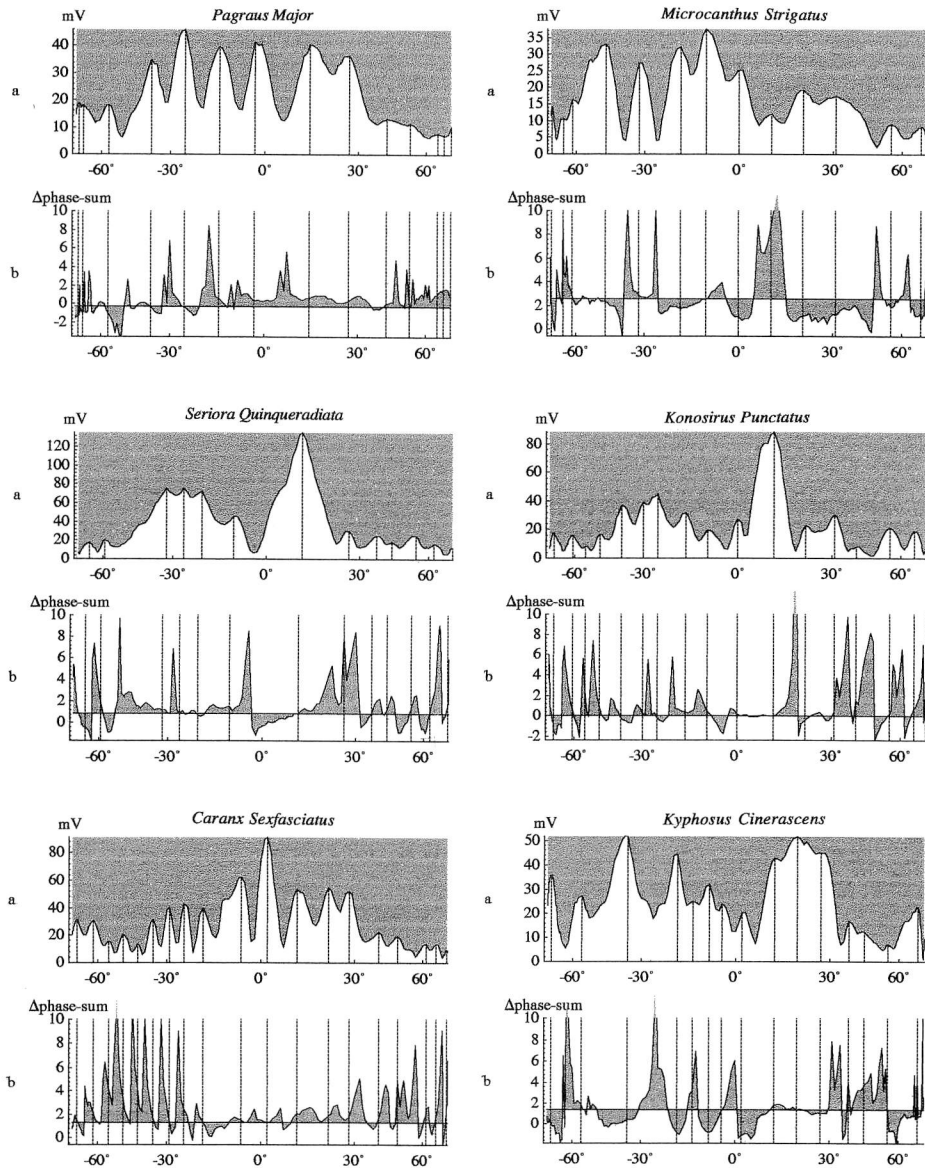


Fig. 5-12(1). Results of  $\Delta \psi_{\text{sum}}$  analysis in various species and condition(1); a, reflecting pattern in difference of propagation distance-reflected voltage coordinate; b, Variation of  $\Delta \psi_{\text{sum}}$  in the reflected pulse; Hatching area are the influence of interference; Dashed lines are maximum point in reflecting patterns.

についてある程度の関連は得られたものの、魚体の構造推定に直接つながるような結果には至らなかった。しかし位相進行量は波形の持つ情報のごく一部であり、より多様な角度から波形の持つ情報を検討する必要がある。

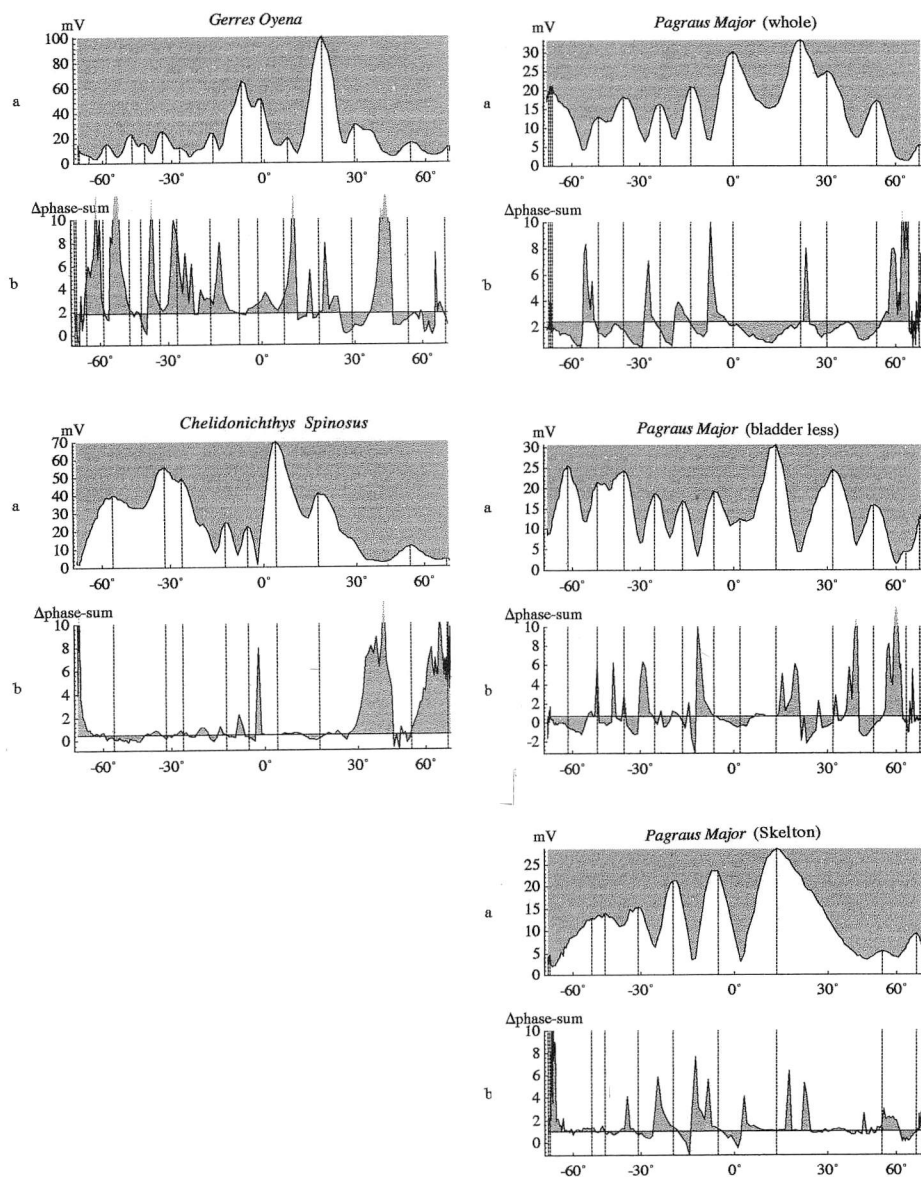


Fig. 5-12(2). Results of  $\Delta\psi_{\text{sum}}$  analysis in various species and condition(2).



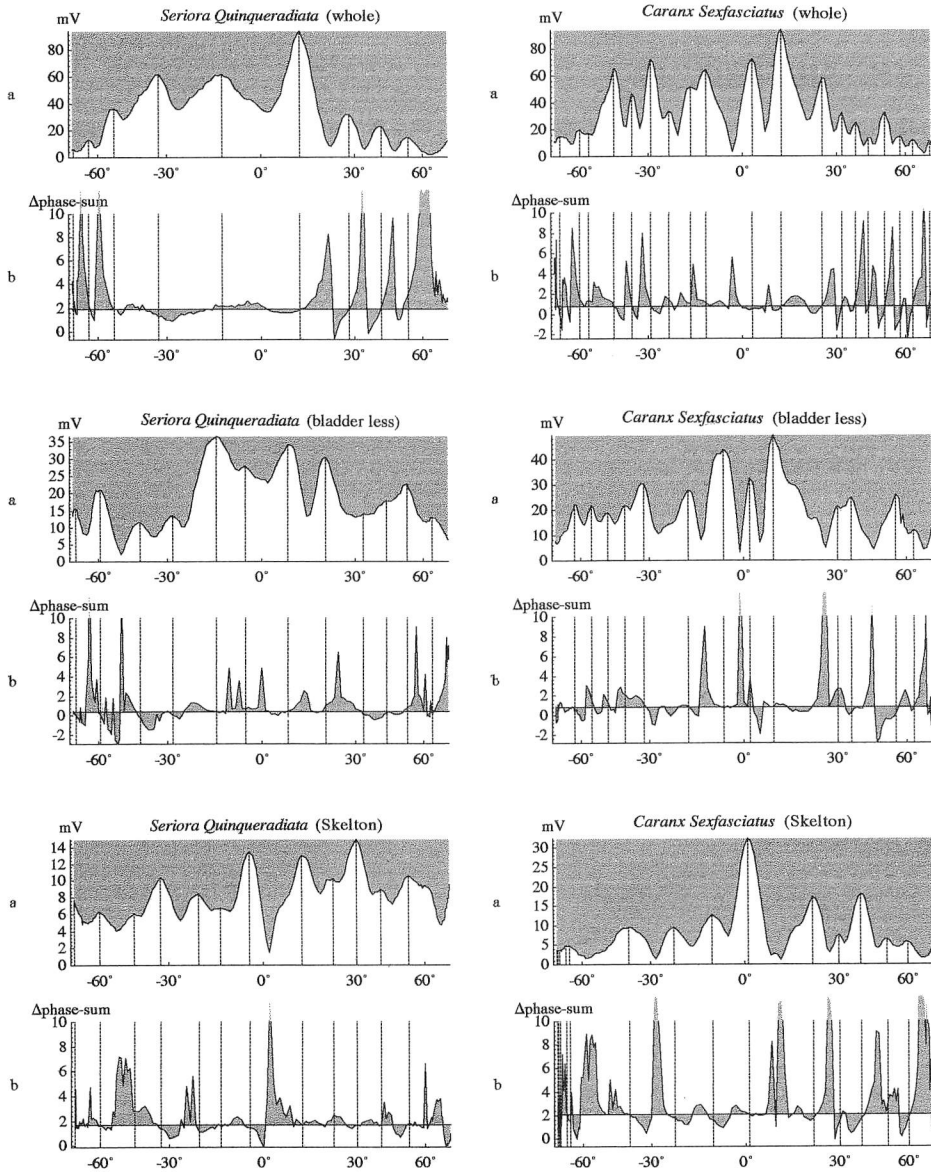


Fig. 5-12(3). Results of  $\Delta\psi_{\text{sum}}$  analysis in various species and condition(3).

## 第6章 総 合 考 察

単体魚の超音波反射について、搬送波周波数帯域における反射波形の干渉，という観点から実験を行い，検討してきた。本章ではそれらのまとめとして干渉をおこす離散的な反射音源の集合体として魚体を考察し，反射指向性パターンおよび反射波形の変動が持つ情報の利

用について検討する。

## 6.1 多数の連続波の合成と干渉

3.1節では2連続波による干渉を説明した。ここで合成される波が多数である場合の干渉を考える。

(3-5) 式をM個の波の合成に拡張すると合成振幅  $A_R$  は

$$A_R^2 = \sum_{i=1}^M A_i^2 + \sum_{i \neq j}^M A_i A_j \cos(\phi_i - \phi_j) \quad (6-1)$$

となる。ここでM個の波を水中に分布する同一反射強度で指向特性がブロードである魚体からの反射と考え、Mが十分大きく反射源の空間的な分布が一様ランダムと仮定すると、(6-1) 式の干渉項は0に集束して

$$A_R^2 = \sum_{i=1}^M A_i^2 \quad (6-2)$$

が成り立つ。(6-2) 式から反射源の数Mを推定するのが積分方式による資源量推定の基本原理である。

Mが2よりも大きく、かつ比較的少数のときには一様ランダムとはみなせないので干渉による変動が現れる。入射角度を連続的に変化させたときに周期振動を起こす基本要素は、一定の音源間隔を持つ2つの波の干渉であるので、M個の音源の干渉による変動は振動要素数K個の周期振動の重ね合わせとなる。KはM個から2個取り出す組み合わせ数であり

$$K = {}_M C_2 = \frac{M(M-1)}{2} \quad (6-3)$$

となる。K個の中に周期が等しいものがあれば、実際に測定される変動周期の要素数はより少なくなる。ここで振動数についてスペクトルを考えると、分離可能なスペクトル数はK個以下である、ということになる。Mが偏りを持たずに増加すると、Kは指数関数的に増加しスペクトルは平坦化する。したがって干渉による変動は観測されなくなり(6-2) 式が適用されるようになる。このことから逆に反射指向性パターンに周期性のある大きな変動が現れたとき、そのパターンを構成する反射音源は比較的少数で近似可能である、という仮説がたてられる。

実際の魚体は少数の点音源が離散的に存在するものではなく、無数の異なる反射率をもつ点音源が連続的に存在すると考えるのが妥当である。しかし無数の反射音源の分布は一様ランダムではなく偏りを持ち、それぞれの点音源集団が干渉して周期性のある変動を起こすと解釈できる。魚体の音響反射に大きく寄与するとされる鰾は反射率の高い点音源の集合体である。鰾の反射については Foote が鰾形状の精密な測定<sup>65, 66)</sup>によって、古澤が中空回転楕円体近似<sup>67)</sup>によって、それぞれ理論的に反射指向性パターンを求めているが、いずれも魚体全体の反射指向特性よりもブロードであるとされている。したがって鰾を構成する無数の反射

音源は反射指向性パターンの干渉による変動の上では、ひとつの反射音源として振舞っていることになる。

(3-10)式で明らかなように反射指向性パターンに振動数1以上の振動を与える条件として、 $d$ は $\lambda/4$ より大きいことが必要である。 $\lambda/4$ 以内に連続的に分布する点音源は集団としてわずかな指向性を示すが、反射指向性パターンの大きな変動を説明する上ではひとつの成分波として扱える。また反射指向性パターンに特定の周期性のある変動が現れる場合には、初期位相 $90^\circ$ から $0^\circ$ までの成分が合成してひとつの成分波をつくり、 $90^\circ$ から $180^\circ$ までの成分がもうひとつの成分波をつくる。この両者の仮想的な反射音源間の間隔に応じて反射波が干渉し、特定の入射角の変化に対して周期的に変動したとみなせる。

## 6.2 反射指向性パターンおよび反射波形の変動と魚体構造に関する情報

従来の個体推定では、ある平均TSを持つ反射信号が測定されても、それが干渉性の低い小さな魚体（単純な形状で体長に比して鰭の大きい魚体など）であるか、干渉性の高い大きな魚体（無鰭魚など）であるか、識別することはできない。そこで反射指向性パターンの変動と反射波形の変動から得られる反射体に関する情報について考察する。

魚体の反射は複雑なために小数の点音源が離散して存在するようなモデルを想定することは現実的ではない。しかし実験および理論的検討の結果から、反射指向性パターンの変動を測定してその変動を再現するような少数の仮想的な音源を再構成する、ということは可能であろう。このような方法でモデル化できれば、仮想的な反射音源の間隔、すなわち空間的な広がりや推定でき、骨格と鰭の相対的な位置関係の推定などに利用できるであろう。仮想的な音源間隔の情報は魚種・魚体型の特徴とも関連し、TSを基礎とする従来の個体推定理論を補足することによって推定精度を高めることが期待できる。

しかしフィールドでの測定においては懸垂法によって得られるような正確な反射指向性パターンを求めることは不可能であり、何らかの代替手段が必要になる。そこで注目されるのが反射パルスの波形変動である。

振幅がそれぞれ $A_1$ 、 $A_2$ であるふたつのパルスの合成を考える。両者の位相差が $0^\circ$ で合成されるときには合成振幅は $A_1 + A_2$ となり反射源の最大反射能力の情報を最も忠実に保存する。両者の位相が異なる場合には合成振幅は干渉の影響により $A_1 + A_2$ より小さい値となり、逆位相に近い場合には反射体に関する情報はほとんど保存されない。この例からも明らかであるが干渉による影響が存在する場合には振幅の情報は反射体の持つ情報と線形な関係で結ぶことができない。したがって干渉の影響が0に収束することを前提とする線形のソーナー方程式を適用すると誤差を伴うことになる。

一方合成パルスの搬送波周期は同位相の場合では乱れは生じず、情報量は0である。両者の位相が異なる場合は3.2節で述べたように搬送波周期に乱れを生じる。要約すれば振幅の情報だけでは反射体の情報を再現することは困難であるが、波形の情報を補足的に勘案することによってその精度を向上させることができる、ということである。

従来行われてきた魚体のモデル化は基本的に順問題として扱われてきた。ある幾何学的な

モデルを考案し、そのモデルが示す変動を理論的に導かれる確率密度関数 (PDF) で表し、実際の魚体からの反射を統計的に処理した振幅分布と比較する、という手法が代表的なものである。その目的はモデルの特性を一般特性として様々な魚種・体長の魚体に適用し、資源量推定の基本パラメータを定めることにあった。また魚体の反射を少数の点音源の配列 (点アレイモデル) で近似させる、という考え方はモデル化理論の中にすでに存在していた。Clay and Heist<sup>68)</sup> は魚体の運動に伴う TS あるいは反射振幅の変動を、体軸方向に分布する複数の点音源からの反射波の合成と考え、ここから導かれる振幅の PDF を用いて反射指向性パターンの変動を説明した。しかしこの方法も 1 次情報としては TS のみに立脚し、順問題として現象を説明しようとするものである。これらの理論モデルには成分波の位相が考慮されており反射指向性パターンにおける極の形成を説明しているが、位相そのものを測定して魚体の構造に関する情報源とするものではなかった。

一方仮想的な音源間隔の推定は、反射指向性パターンや反射波形の変化からその要因を推定しようとする一種の逆問題である。海洋音響の分野では逆問題の解法 (inversion method) について様々な角度から検討されている<sup>69)</sup> が魚体の構造推定への応用例は報告されていない。今後研究の方向性として検討の価値があると考えている。

序論でも述べたように現在の音響資源調査では平均 TS、ソーナー方程式、統計的な処理を基礎におく方法が主である。この観点からは干渉や変動などの成分は相殺され除外される情報である。

古澤の回転楕円体モデルでは、鰐 (中空回転楕円体) の反射はその他の部分 (液体回転楕円体) よりも変動の少ない安定した特性を持ち、その上に他の部分の反射要素が重なって干渉による山と谷を生じる、と分析されている。したがって干渉性のある成分によって生じた山と谷は平均値を求める過程で相殺されるので、平均 TS は鰐の反射成分では説明されることになる<sup>70)</sup>。この見解は多くの平均 TS に関する実験により裏付けられ、計量魚群探知機に関する研究者の共通認識になりつつあり、長年論議されてきた鰐の影響について決着がついたかの感がある。しかしこの見解は、鰐以外の魚体構成部からの反射成分が絶対的に小さい、ということを示すものではない。骨格、体表などの反射が干渉性を持つために足し合わせの干渉と打ち消しあいの干渉現象が平均化の過程で相殺され、平均 TS の値に寄与する割合が小さい、と解釈することが妥当であろう。したがって鰐以外の魚体構成部分による干渉が反射指向性パターンの大きな変動の原因となることを否定するものではない。第 5 章で示したように全体のパワーに寄与する割合が小さくとも測定される振幅値に非常に大きな影響を与える成分が存在することがわかった。

すなわち反射波の波形を搬送波周波数領域で多角的に分析することによって干渉の実態を明らかにできれば、反射体の構造に関する新たな情報、たとえば骨格などの干渉性のある成分を仮想的音源と推定して、その空間的な広がりや、また安定成分である鰐との相対的な位置関係、あるいは干渉による打ち消し合いの影響を除去したターゲット固有の最大反射強度などを推定することも可能であろう。実用的な見地からは、①安定成分を持つ鰐魚と干渉性が高いと考えられる無鰐魚を波形の変動から識別する、②干渉による打ち消し合いが起きている波形を判別して除外することにより干渉性の高い生物の資源量推定の安定化をはか

る、③比較的低密度の魚が生息するとき反射波形から個体間隔や個体数を推定する、などの応用が期待できる。

## 結 論

球体、単体魚およびそのいくつかのモデルについて反射指向性パターンの変動、波形の変動を観察・検討し、時系列処理とスペクトル解析の手法を用いることによっていくつかの知見が得られた。以下にその要約を示す。

### 1. 観察実験およびシミュレーション

- 1) 単一球体の反射波形はハイドロホンで測定した送信波形に比較して、立ち上がり・立ち下がりのなだらかな“なまり”のある波形であるが、変動の少ない安定した波形であり位相差や搬送波周期の測定に十分使用できることが確認できた。
- 2) 個体魚および2球体の反射指向性パターンの極大値付近では単一球体の反射波形に近似した安定した基本波形であった。
- 3) 個体魚および2球体の反射指向性パターンの極小値近傍では波形は大きく変化し、特徴的な亜鈴型の波形が観察された。これを2波形の合成と考え、シミュレーションを試みた結果、パターン変動の周期性および極小点近傍の歪んだ波形を再現でき、搬送波を含む波形の単純な重ね合わせで現象論的に説明できた。
- 4) 魚体模型は、極大値の波形が基本波形と異なった形状を示す傾向があり、極小値の波形も2球体の場合と比較してより複雑な変動を示した。魚体模型は内部構造が均質であるため、その反射波形は連続した無数の仮想的音源からの反射が合成した波形とみなす必要があり、離散的な少数の波形の合成とは異なる傾向を持つことが推察された。魚体の反射波形の変動は、球体の反射の合成に近い傾向を示した。このことから魚体の反射波形の変動は単純な干渉モデルで近似可能であることが推察された。
- 5) 2球体の場合、反射指向性パターンが示す変動の周期性は2球体間の間隔を反映しており、魚体の場合に見られる周期性も干渉を起こす主要な成分間の間隔に関する情報を保有していることが推察された。
- 6) 実際のフィールドに近い条件である湖での制御法による実験および自然遊泳状態の単体魚のエコー記録においても基本的な干渉の現象は認められた。したがって干渉による変動は、伝搬距離が短く空間的に限定された水槽実験に特有の現象ではないことが確認された。

以上の点から、反射波形の変動あるいは反射指向性パターンの変動そのものが反射体の構造に関する情報を保有しており、個体推定に新たな情報をもたらす可能性があると推察できた。

## 2. 2球体および魚体についての精密実験

- 1) 2球体の反射指向性パターンは伝搬距離差によって一定の周期を持つ規則的な変動(振動)をする。そこで入射角度の変化を伝搬距離差の変化に座標変換し、自己相関を利用して正確な振動数を求め球体間隔を計算した。
- 2) 2球体の干渉による波形の変動では、搬送波周期の微小な変動を測定した結果、干渉によって反射信号電圧が低下するとき搬送波周期も変動し、干渉の状態を知るために利用できる可能性が確認できた。
- 3) 魚体の反射指向性パターンを伝搬距離差座標に変換し、フーリエ変換によるスペクトル解析を試みた。その結果音響エネルギーとしては小さいが反射指向性パターンに大きく影響する成分を分離できた。また自己共分散係数を利用して各魚体を代表する仮想的な音源の間隔を計算した。その結果自己共分散係数曲線には魚種による相違が認められ、音源間隔の計算値も魚種による相違が認められた。
- 4) 魚体全体の反射に対する鰓・骨格の寄与を評価した結果魚種による差が認められた。
- 5) 魚体の反射波形の変動も2球体の場合と同様、反射信号が低下するとき搬送波周期が変動する傾向があり、干渉の影響の評価に利用できることが推察された。

単体魚のTS測定には“あばれ”と呼ばれている大きな変動が伴い、その扱いについて研究者を悩ませてきた。この問題に対して変動を均すための手法はさまざまな角度からなされてきたが、その本質を実証的に明らかにする研究は少ない。反射指向性パターンと波形の変動の解析はこの問題を明らかにするための有力な手段となることが示唆できた。反射指向性パターンの変動を離散的な確率過程としてとらえるのではなく、連続的な仮想音源間隔の変化系列としてとらえることによって魚体の構造推定に資する知見が得られた。また、搬送波を含む反射波形は音響エネルギーというひとつの数値以上の情報を持ち得ることを明らかにすることができた。今後さらに理論的検討と具体的な応用を進めていきたい。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり、終始ご指導をいただくとともに、数々の便宜をおはかりいただいた北海道大学水産学部元教授 佐野典達 博士に厚くお礼申し上げます。また研究の指針をご教示頂いた鹿児島大学水産学部教授 松野保久 博士、ならびに北海道大学水産学部助教

授 飯田浩二 博士に心より感謝申し上げます。

また本論文のご査読を頂いた北海道大学水産学部元教授 五十嵐脩蔵 博士，同教授 天下井 清 博士に心から感謝の意を表します。

鹿児島大学水産学部助教授 四宮明彦 博士には魚体の軟X線写真撮影に際して数々の便宜をおはかりいただきました。厚くお礼申し上げます。

実験に際しては北海道大学水産学部助手 向井 徹 氏ならびに同学漁業測器学講座の大学院生・学生諸氏，鹿児島大学水産学部助手 藤枝 繁 氏ならびに同学漁船航海学講座学生諸氏の多大なるご助力を得ました。深く感謝いたします。

## 文 献

- 1) O. Sund (1935) : Echo Sounding in Fishery Research. *Nature*, 35, 953.
- 2) 宇田道隆 (1952) : 海中超音波による水産生物研究の進歩. *科学*, 22(2), 22-27.
- 3) D. H. Cushing (1952) : Echo-Surveys of Fish. *J. Cons. perm. int. Explor. Mer.* 18, 45-60.
- 4) 黒木敏郎・中馬三千雄 (1953) : 水平魚群探知機に関する研究 (第1報) 池田湖に於ける魚群量の推定. *鹿大水紀要*, 3, 56-64.
- 5) T. Yokota, T. Kitagawa and T. Asami (1953) : Basic study of fish school reserch by fish finders. *Bull. Jap. Soc. Sci. Fish*, 19, 347-371.
- 6) 石田正巳・鈴木恒由・佐野典達 (1955) : 音響測深機による魚群量の近似評価について. *北海道大学研究彙報*, 5, 362-367.
- 7) S. Machlup and J. B. Hersey (1955) : Analysis of sound-scattering observations from non-uniform distributions of scatterers in the ocean. *Deep-Sea Research*, 3, 1-22.
- 8) R. B. Mitson and R. J. Wood (1960) : An automatic method of counting fish echoes. *J. du Conseil*, 26, 281-291.
- 9) O. Dragesund and S. Olsen (1965) : On the possibility of estimating year-class strength by measuring echo-abundance of 0-group fish. *Fiskeridir. Skr. Ser. Havunders* 13, 48-75.
- 10) R. E. Thorne and H. W. Lahore (1969) : Acoustic techniques of fish population estimation with special reference to echo integration. *Cir. Fish. Res. Inst. Univ.*, 69-10, 10.
- 11) P. H. Moose (1971) : "A simplified analysis of the statistical characteristics of the fish echo integrator", Univ. Washington Sea Grant Publication, WSG-71-2, 28.
- 12) J. B. Lozow and J. B. Suomala (1971) : The application of hydroacoustical methods for aquatic biomass measurements. *Charles Stark Draper Laboratory Rep*, R-712, 92.
- 13) J. E. Ehrenberg (1973) : "Estimation of the intensity of a filtered Poisson process and its application to acoustic assessment of marine organisms", Univ. Washington Sea Grant Publication, WSG-73-2, 135.
- 14) E. Götze (1977) : Hydroakustische Bestandsbestimmung an dichten Fischkonzentrationen. *Seewirtschaft*, 9, 290-292.
- 15) J. E. Ehrenberg, J. J. Traynor and J. Williamson (1980) : An evaluation of methods for in directly measuring the mean acoustic scattering cross section of fish. *IEEE*, 371-375.
- 16) 山中 一・行縄茂理・森田二郎・山中一郎・西村 実・吉谷瑞男 (1971) : 超音波魚量計数装置に関する研究報告 (1). *遠洋水研*, 21.
- 17) 鈴木恒由・藺田平雄 (1972) : サケ・マス用魚探機の試作とその試験結果について. *日水誌*, 38, 463-469.

- 18) 佐野典達・見上隆克・浅野一彦・秋葉芳雄・安間 元 (1981): 茂辺地川に遡上するサケの計数装置の試作・試用に関する研究. 北大水産研究彙報, 32, 388-399.
- 19) 佐野典達・見上隆克・浅野一彦・秋葉芳雄・安間 元 (1985): サケ・マスの遠隔自動計測システムの開発に関する研究. 昭和59年度科学研究費補助金 (試験研究 (2)), 研究成果報告書
- 20) 古澤昌彦・石井 憲・間庭愛信 (1980): 超音波魚量計の開発. 電子通信学会技術研究報告, 80 (144), 1-8(US80-20).
- 21) 飯田浩二 (1987): “魚群探知機を用いた低密度魚群の資源量推定および生態計測に関する研究”, 北海道大学 博士学位論文, pp. 70-83.
- 22) M. Furusawa and Y. Miyanohana (1988): Application of echo-trace analysis to estimation of behaviour and target strength of fish. J. Acoust. Soc. Jpn. (E), 9, 169-189.
- 23) T. Hashimoto (1953): Characteristics of ultrasonic waves transmitted vertically in the water. Rep. Fish. Boat lab., 1, 1-104.
- 24) R. W. G. Haslett (1964): The acoustic back-scattering cross sections of short cylinders. Brit. J. Appl. Phys., 15, 112-124.
- 25) M. J. Tucker and A. R. Stubs (1968): The reflection of sound by fish. National institute of oceanography, Internal Report, A, 12.
- 26) L. Midttom and I. Hoff (1962): Measurements of the reflection of sound by fish. Fiskeridir. Skr. Havundersok, 13-13, 1-18.
- 27) R. W. G. Haslett (1961): The Quantitative Evaluation of Echo-Sounder Signals from Fish. J. Brit. I. R. E., 22, 33-42.
- 28) R. W. G. Haslett (1962): The Back-scattering of Acoustic Waves in Water by an Obstacle I. Design of Scale model and Investigation of its Validity. Proc. Phys. Soc., 79, 542-559.
- 29) R. W. G. Haslett (1962): Determination of the acoustic back-scattering patterns and cross sections of fish, Brit. J. Appl. Phys., 13, 349-357.
- 30) K. G. Foote (1980): Averaging of fish target strength functions. J. Acoust. Soc. Am., 67, 504-515.
- 31) K. Huang and C. S. Clay (1980): Backscattering cross sections of live fish: PDF and aspect. J. Acoust. Soc. Am, 67, 795-802.
- 32) 宮野鼻洋一・石井 憲・古澤昌彦 (1986): 魚体のターゲットストレングスの平均方法の検討. 水工研報告, 7, 87-96.
- 33) 飯田浩二 (1988): 魚のターゲットストレングス研究の現状と展望. 海洋音響研究会誌, 15, 207-218.
- 34) G. C. Goddard and V. G. Welsby (1986): The acoustic target strength of live fish. J. Cons. int. Explor. Mer, 42, 197-211.
- 35) D. Ponton and H. J. Meng (1990): Use of dual-beam acoustic technique for detecting young whitefish, *Coregonus* sp., juveniles: first experiments in an enclosure. J. Fish Biol., 36, 741-750.
- 36) 向井 徹・飯田浩二・佐野典達 (1991): ケージ内魚群からの魚群エコーの日変化について. 北大水産研究彙報, 42, 90-97.
- 37) J. E. Ehrenberg (1974): Two Applications for a Dual-Beam Transducer in Hydro-acoustic Fish Assessment Systems. Proc. 1972 IEEE Conf. on Engineering in the Ocean Environment, 1, 152-155.
- 38) J. E. Ehrenberg (1979): A Comparative Analysis of *In Situ* Methods for Directly Measuring the Acoustic Target Strength of Individual Fish. IEEE J. Ocean. Eng., OE4, 141



- 152.
- 39) 笹倉豊喜・遠藤保彦 (1985) : 理想ビームパターンに近い送受波器. 昭和60年度海洋音響研究会講演論文集, 85, 5-8.
- 40) J. J. Burczynski (1986) : Application of Dual-Beam Acoustic Survey Techniques to Limnetic Populations of Juvenile Sockeye Salmon (*Oncorhynchus nerka*). Can. J. Fish. Aquat. Sci. 45, 43, 1776-1788.
- 41) K. G. Foote, E. H. Kristensen and H. Soli (1984) : Trial of a new, split-beam echo sounder. Coun. Meet. Int. Coun. Explor. Sea B : 21.
- 42) J. J. Traynor and J. E. Ehrenberg (1987) : Fish and standard sphere target strength measurements obtained with a split beam-dual beam system. Int. Sympo. Fish. Acoust., Seattle.
- 43) 飯田浩二・向井 徹・石井清彦 (1990) : デュアルビーム法による魚体長の推定について. 北大水産研究彙報, 41, 200-204.
- 44) R. H. Love (1969) : Maximum Side-Aspect Target Strength of an Individual Fish. J. Acoust. Soc. Am., 46, 746-752.
- 45) R. H. Love (1971) : Dorsal-Aspect Target Strength of an Individual Fish. J. Acoust. Soc. Am., 49, 816-823.
- 46) R. H. Love (1977) : Target strength of an individual fish at any aspect. J. Acoust. Soc. Am., 62, 1397-1403.
- 47) K. G. Foote (1979) : Fish target strength-to-length regressions for application in fisheries research. Ultrasonic Int. Conf. Exhib., 327-332.
- 48) K. G. Foote (1979) : On Representing the Length Dependence of Acoustic Target Strengths of Fish. J. Fish. Res. Board Can., 36, 1490-1496.
- 49) B. J. Robinson (1982) : An *in situ* technique to determine fish target strength, with results for blue whiting (*Micromesistius poutassou* (Risso)) : J. Cons. int. Mer, 40, 153-160.
- 50) 間庭愛信・古澤昌彦 (1972) : FM 魚群探知機の研究. 水産庁漁船研究資料.
- 51) M. Okujima and S. Ohtsuki (1981) : Observtion of Underwater Ultrasound Propagation in the Sea by Two-Period M-Sequence Signal Method. Japaneses Journal of Applied Physics, 20, 37-239.
- 52) 棚田嘉博・吉田 宏・長澤庸二 (1991) : パルス圧縮ソーナに適した実数直交 PN 系列の実験的検証. 電子情報通信学会論文誌 B - II, J 74-B-2, 215-224.
- 53) 柴田恵司 (1969) : “魚体による超音波反射の微構造に関する研究”, 北海道大学 学位論文, pp. 17-21.
- 54) 飯田浩二・鈴木恒由 (1981) : 魚群探知機を用いた北海道倶多楽湖におけるヒメマスの資源および生態に関する研究. 北大水産研究彙報, 32, 272-280.
- 55) 松野保久・山中有一 (1990) : 2 球体の超音波 (50kHz) 反射パルス波形情報利用のための実験に基づく検討. 日水誌, 56, 1219-1224.
- 56) R. J. Urlick (1975) : “水中音響の原理” (土屋 明訳), pp. 18-31 (共立出版, 東京)
- 57) 松野保久・山中有一 (1990) : マダイおよびその模型魚の超音波 (50kHz) 反射パルス波形情報. 日水誌, 56, 1225-1229.
- 58) 古澤昌彦 (1990) : 水産資源推定のための超音波による魚群探知に関する研究. 水工研研究報告, 11, 188-189.
- 59) 山中有一・松野保久 (1992) : 球体および魚体のエコー波形と反射パターンの変動. 日水誌, 58, 187-192.

- 
- 60) 日野幹雄 (1977) : “スペクトル解析”, pp. 25-48. (朝倉書店, 東京).
  - 61) K. V. Mckenzie (1981) : Nine-term equation for sound speed in the oceans. *J. Acoust. Soc. Am.*, 70, 807-812.
  - 62) 山中有一・松野保久 (1993) : 単体魚の背方向反射指向性反射パターンのスペクトル解析. *日水誌*, 59, 1701-1707.
  - 63) B. P. Pasaribu (1982) : Acoustic Refraction from Fish Model Targets. *J. Fac. Mar. Sci. Technol., Tokai Univ.*, 15, 229-245.
  - 64) 南 茂夫 (1986) : “科学計測のための波形データ処理”, pp.122-164, (CQ 出版社, 東京).
  - 65) K. G. Foote and E. Ona (1985) : Swimbladder Cross Sections and Acoustic Target Strengths of 13 Pollack and 2 Saithe, *Fiskeridir Skr. Ser. Havunders.*, 18, 1-57.
  - 66) K. G. Foote (1985) : Rather-high-frequency sound scattering by swimbladdered fish. *J. Acoust. Soc. Am.*, 78, 688-700.
  - 67) M. Furusawa (1988) : Prolate spheroidal models for predicting general trends of fish target strength. *J. Acoust. Soc. Jpn. (E)*, 9, 13-24.
  - 68) C. S. Clay and B. G. Heist (1984) : Acoustic scattering by fish-Acoustic models and a two-parameter fit. *J. Acoust. Soc. Am.*, 75, 1077-1083.
  - 69) 竹内俱佳 (1988) : 海洋音響におけるインパース法. (海洋音響研究会インバージョンメソッド部会報告書), pp. 4-7.
  - 70) K. G. Foote (1980) : Importance of the swimbladder in acoustic scattering by fish : A comparison of gadoid and mackerel target strengths. *J. Acoust. Soc. Am.*, 67, 2084-2089.